



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

ULB

# **Ermittlung der Eigenschaftsänderungen von Wellpappe beim mehrfachen Recycling und Abschätzung der maximal möglichen Umläufe**

Kreplin, Frederic; Hans-Joachim, Putz  
(2020)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00012681>

Lizenz:



CC-BY-NC-ND 4.0 International - Creative Commons, Attribution Non-commercial, No-derivatives

Publikationstyp: Report

Fachbereich: 16 Department of Mechanical Engineering

Quelle des Originals: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/12681>

---

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19685 N

## Thema

Ermittlung der Eigenschaftsänderungen von Wellpappe beim mehrfachen Recycling und Abschätzung der maximal möglichen Umläufe

## Berichtszeitraum

01.09.2017 bis 31.03.2020

## Forschungsvereinigung

Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e. V.

## Forschungseinrichtung(en)

FE 1: Technische Universität Darmstadt

Darmstadt, 24.06.2020

---

Ort, Datum

F. Kreplin



---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Zusammenfassung

Altpapier ist mit 74,5 % der eingesetzten Faserstoffe die mit Abstand wichtigste Rohstoffquelle der deutschen Papierindustrie. Im Teilbereich der Verpackungspapiere liegt die Altpapiereinsatzquote aktuell sogar bei 108 %, sodass Altpapier für diesen Bereich ein essentieller Rohstoff ist. In den Statistiken der letzten 15 Jahren bestätigt sich der Trend, dass die Produktion von grafischen Papieren immer weiter zurückgeht, während die Produktion von Verpackungspapieren stetig ansteigt. Dies hat im Recyclingsystem zur Folge, dass immer weniger frische Fasern aus dem grafischen Bereich in die Verpackungspapiere eingetragen werden. Die häufig postulierte Aussage, dass Fasern lediglich 5 bis 7 Mal rezykliert werden könnten, würde langfristig zu einem Kollaps des Recyclingsystems führen, da zu wenige Frischfasern eingetragen würden.

Das Mehrfachrecycling von Fasermaterialien für die Papierproduktion wurde bereits in der Vergangenheit wissenschaftlich untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen beziehen sich auf verschiedenste Ausgangsmaterialien (Zell- und Holzstoffe) und Prozessschritte beim Recycling und deren Auswirkungen auf das Fasermaterial. In keiner dieser Untersuchungen ist eine Aussage zur limitierten Lebensdauer von Fasern zu finden. Die Untersuchungen wurden in der Regel nach unterschiedlich vielen Recyclingzyklen abgebrochen, weil nicht mehr ausreichend Material zur Verfügung stand, um weitere Zyklen durchzuführen. Die Auswirkungen des Recyclings auf die Fasern müssen differenziert betrachtet werden, da sie je nach Faserart und Verfahrensschritten unterschiedlich stark ausfallen.

Untersuchungen zum Mehrfachrecycling im Bereich der Wellpappenroh-papiere sind selten. Zudem wurden Aspekte der Produktion von Wellpappe und der Einfluss der Stärke zur Verklebung der Wellpappe und zur Steigerung der Papierfestigkeit, z. B. durch Leimpresenapplikation, bisher nicht detailliert betrachtet.

Daher wird in diesem Projekt zunächst im ersten Arbeitspaket das Mehrfachrecycling von 5 Wellpappenroh-papieren bestehend aus Kraftliner, NSSC-Fluting, Testliner 2 bzw. 3 und Wellenstoff sowie einer Mischung aus 20 % Kraftliner, 40 % Testliner 3 und 40 % Wellenstoff untersucht. Die Mischung stellt dabei die repräsentative prozentuale Einsatzmenge der Papiere für die deutsche Wellpappenproduktion im Jahr 2018 nach. Im zweiten Arbeitspaket werden Zerkleinerungsbedingungen und die Applikation von Stärke untersucht. Arbeitspaket drei befasst sich mit den Einflüssen der Wellpappenherstellung auf das Recyclingpotential der Fasern. Die Erkenntnisse der

Laboruntersuchungen in den Arbeitspaketen 1 bis 3 werden im vierten Arbeitspaket im Pilotmaßstab überprüft. Abschließend findet eine Modellierung des Mehrfachrecyclings im letzten Arbeitspaket statt.

Die Ergebnisse des Mehrfachrecyclings im ersten Arbeitspaket zeigen keine Verschlechterung der mechanischen Prüfergebnisse für die einzelnen Wellpappenrohapiere. Vielmehr steigen die Festigkeitskennwerte durch den Verlust der Füllstoffe im Verlauf des Mehrfachrecyclings an. Die Retention der Füllstoffe ist bei der Versuchsreihe der Wellpappenrohpapier-Mischung durch eine veränderte Prozessführung verbessert worden, wodurch die Festigkeitskennwerte in den 25 Recyclingzyklen leicht zurückgehen. Die Füllstoffmenge im Papier ist somit ein wichtiger Hebel für die Festigkeitseigenschaften von Recyclingpapier. Die Applikation von Stärke in Arbeitspaket 2 steigert wie erwartet die Festigkeit der Papiere auf ein höheres Niveau. Der Verlauf der Messdaten mit Stärkeapplikation ähnelt dem Verlauf der Messdaten ohne Stärkeapplikation. Der Stärkeeintrag verbessert die Füllstoffretention, sodass der Kurvenverlauf mit Stärkeapplikation eine etwas geringere Zunahme im Mehrfachrecycling zeigt als die Laborversuche ohne Stärkeapplikation. Durch die Produktion von Wellpappe (Arbeitspaket 3) kann ebenfalls kein negativer Einfluss auf die Festigkeitskennwerte identifiziert werden. Die Fasern werden durch die Verarbeitung zu Wellpappe nicht gekürzt, jedoch wird die mittlere Faserbreite reduziert. Die Erkenntnisse der Laborversuche der vorherigen Arbeitspakete können in Arbeitspaket 4 im Pilotmaßstab bestätigt werden. Nachdem die Füllstoffverluste der ersten 15 Recyclingzyklen im 16. Zyklus kompensiert wurden, zeigt sich, dass das Papier auch nach 16 Recyclingzyklen mit einem vergleichbaren Füllstoffgehalt wie das Ausgangsmaterial (Zyklus 1) ähnliche Festigkeitskennwerte aufweist. Die Modellierung des Mehrfachrecyclings stellt eine besondere Herausforderung dar. Durch die fehlende Kenntnis der Altersstruktur und Faserzusammensetzung der untersuchten Recyclingpapiere ist es nicht möglich eine detaillierte Modellierung des Mehrfachrecyclings durchzuführen. Anhand der Laboruntersuchungen kann der Einfluss der Mineralienverluste nicht eindeutig abgebildet werden, sodass auch die Mischungsregel wegen stark unterschiedlicher Mineraliengehalte nicht überprüft werden kann.

Es bleibt anzumerken, dass in diesen Laboruntersuchungen Prozessschritte der Altpapieraufbereitung, wie Drucksortierung, Cleanerreinigung, Dispergierung oder Mahlung des Faserstoffs, ausgelassen werden mussten, um einerseits Faserverluste

zu minimieren. Andererseits können diese Prozessschritte im Labormaßstab nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand nachgestellt werden, so dass deren Einfluss in den Untersuchungsergebnissen nicht berücksichtigt ist. Allerdings ist zu erwarten, dass der Einfluss dieser unberücksichtigten Prozessschritte auf das Recyclingpotential der Fasern gering ist. Die Prozessschritte mit dem größten Energieeintrag in das Fasermaterial sind in diesen Untersuchungen berücksichtigt. Unberücksichtigt bleibt des Weiteren die Nutzung der Verpackungen und der Einfluss der Umwelteinwirkungen auf das Recyclingpotential des Materials. Dies könnte nur an realem Altpapier untersucht werden. Mehrfachrecyclingversuche im industriellen Maßstab mit realem Altpapier würden diese unberücksichtigten Einflüsse abdecken, könnten jedoch keine Auskunft über maximal mögliche Faserzyklen liefern, wären zudem extrem aufwändig und vermutlich durch den Einfluss weiterer Additive zur Herstellung von Papierprodukten überlagert.

Nichtsdestotrotz konnte im Labor- und Pilotmaßstab gezeigt werden, dass das Fasermaterial deutlich häufiger als die postulierten 5 bis 7 Mal rezykliert werden kann, ohne signifikant an Qualität zu verlieren oder gar unbrauchbar zu werden. Nach bis zu 25 Recyclingzyklen im Labormaßstab bzw. 16 Zyklen im Pilotmaßstab ist das Fasermaterial weiterhin geeignet, um daraus qualitativ nahezu gleichwertiges Recyclingpapier herzustellen. Die Anzahl der Recyclingzyklen ergibt sich nicht aus der Qualität des Fasermaterials, sondern aus den Füllstoff- und Faserverlusten während der Untersuchungen. Es ist somit nicht möglich, pauschal eine maximale Anzahl der Recyclingzyklen anzugeben. Ein Kollaps des Recyclingsystems im Bereich der Verpackungspapiere wegen zu häufig rezyklierten Fasern ist aus den Erkenntnissen der Labor- und Pilotuntersuchungen nicht zu erwarten. Vielmehr entstehen Schwierigkeiten für das Recyclingsystem im Bereich der Verpackungen durch ungeeignetes Verpackungsdesign und der Verwendung ungeeigneter Materialien für das Papierrecycling, die bei der Altpapieraufbereitung zu Problemen und/oder hohen Verlusten führen. Somit ist die Zusammenarbeit aller Beteiligten des Papierkreislaufs, von der Papierherstellung und -verarbeitung bis hin zu Produzenten von Chemikalien, Klebstoffen und Beschichtungsmaterialien sowie den Nutzern der Verpackungen, den Beteiligten bei Altpapierfassung und -sortierung enorm wichtig, um das Fasermaterial möglichst lange im Recyclingsystem zu halten und vermeidbare Stoffverluste zu minimieren.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	I
Inhaltsverzeichnis .....	IV
Abkürzungsverzeichnis .....	VI
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	1
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Stand der Forschung und Entwicklung .....	2
1.2.1 Überblick Recyclingzyklen allgemein .....	2
1.2.2 Recycling von Zellstoff .....	4
1.2.3 Recycling von Holzstoff .....	6
1.2.4 Recycling von Halbzellstoffen .....	8
1.2.5 Recycling von grafischen Produkten .....	8
1.2.6 Recycling von Verpackungsprodukten .....	10
1.2.7 Nicht ausreichend berücksichtigte Mehrfachrecycling-Aspekte .....	11
1.2.8 Faseralter und Faserumläufe .....	12
1.3 Arbeitshypothese .....	13
2 Forschungsziel und Lösungsweg .....	15
2.1 Forschungsziel .....	15
2.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels .....	16
2.2.1 Arbeitspaket 1: Untersuchung des Mehrfachrecyclings verschiedener Faserstoffe .....	18
2.2.2 Arbeitspaket 2: Einfluss von Zerfaserungsbedingungen und Stärkeapplikationen bei der Wellpappenroh papierherstellung auf Altpapierbasis .....	19
2.2.3 Arbeitspaket 3: Einfluss der Wellpappenherstellung auf das Recyclingpotential von Wellpappe .....	19
2.2.4 Arbeitspaket 4: Pilotversuch zum Mehrfachrecycling von Wellpappenroh papier .....	20
2.2.5 Arbeitspaket 5: Modellierung des Mehrfachrecyclings .....	20
2.2.6 Arbeitspaket 6: Dokumentation .....	21
2.3 Personaleinsatz .....	21
3 Material, Geräte und Prüfmethode n .....	22
3.1 Rohstoffe und Materialien .....	22
3.2 Geräte und Anlagen .....	24
3.3 Verwendete Normen .....	29
4 Versuchsdurchführung .....	30
4.1 Arbeitspaket 1: Mehrfachrecycling Wellpappenroh papiere .....	30

4.2	Arbeitspaket 2: Zerfaserung und Stärkeapplikation .....	33
4.2.1	Zerfaserung.....	33
4.2.2	Stärkeapplikation .....	34
4.3	Arbeitspaket 3: Wellpappenherstellung.....	35
4.3.1	Industrielle Wellpappenproben.....	35
4.3.2	Wellpappen-Pilotversuche .....	37
4.4	Arbeitspaket 4: Pilotversuch.....	38
5	Ergebnisse und Diskussion .....	43
5.1	Arbeitspaket 1: Mehrfachrecycling Wellpappenrohapiere .....	43
5.2	Arbeitspaket 2: Zerfaserung und Stärkeapplikation .....	53
5.2.1	Zerfaserung.....	54
5.2.2	Stärke .....	55
5.3	Arbeitspaket 3: Wellpappenherstellung.....	65
5.3.1	Industrielle Wellpappenproben.....	65
5.3.2	Pilotversuche Wellpappenherstellung .....	72
5.4	Arbeitspaket 4: Pilotversuch.....	79
5.5	Arbeitspaket 5: Modellierung.....	89
6	Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) .....	92
6.1	Voraussichtlicher Nutzen der Forschungsergebnisse .....	92
6.2	Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit.....	92
6.3	Aussagen zur voraussichtlichen Umsetzung der FuE-Ergebnisse.....	93
7	Ergebnistransfer .....	94
8	Danksagung .....	97
	Literaturverzeichnis .....	98

## Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BiSa	Birken- Sulfatzellstoff
BuSi	Buchen-Sulfitzellstoff
CaCO <sub>3</sub>	Calciumcarbonat
CEPI	Confederation of European Paper Industries
CM	Case Material - Wellpappenrohapiere
CMP	Chemo-Mechanical Pulp
CMT	Concora Medium Test
CSF	Canadian Standard Freeness
CTMP	Chemo-Thermo-Mechanical Pulp
ECT	Edge Crush Test
FCT	Flat Crush Test
FiSi	Fichten-Sulfitzellstoff
FTE	Full-Time-Equivalent
IfP	Institut für Papierfabrikation
KiSa	Kiefern-Sulfatzellstoff
KL	Kraftliner
LC	Low consistency - Niederkonsistenz
lutro	Lufttrocken
NP	Newsprint - Zeitungen
NR	Nullreißlänge
NSSC	Neutral Sulfite Semichemical
OB	Other Board - Karton
OGP	Other Graphic Paper - andere grafische Papiere
otro	Ofentrocken
PGW	Pressurized Groundwood (Druckschliff)
PMV	Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik
R	Reißlänge
RCT	Ring Crush Test
SCT	Short Compression Test
SGW	Stone Groundwood (Steinschliff)
SPC	Konsortium skandinavischer Papierunternehmen
SR	Schopper-Riegler Wert
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TEA	Tensile Energy Absorption - Arbeitsaufnahmevermögen
TGA	Thermogravimetriemessgerät



TL	Testliner
TMP	Thermo-Mechanical Pulp
VDP	Verband Deutscher Papierfabriken e.V.
VDW	Verband der Wellpappen-Industrie e.V.
VPWP	Vereinigung Pack- und Wellpappenpapiere
WPRP	Wellpappenrohpapier
WRV	Wasserrückhaltevermögen
WS	Wellenstoff

# 1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

## 1.1 Ausgangssituation

Altpapier ist mit 76 % der eingesetzten Faserstoffe (Stand 2019) die mit Abstand wichtigste Rohstoffquelle der deutschen Papierindustrie [1]. Beim Altpapierrecycling werden bereits mechanisch oder chemisch aufgeschlossene Pflanzenfasern erneut eingesetzt. Durch die mehrfache Nutzung der Fasern erleiden sie physikalische und chemische Veränderungen, z. B. durch Faserquetschungen bzw. -kürzungen, die Belegung ihrer Oberflächen durch Störstoffe oder die sog. Faserverhornung. Aufgrund dieser Eigenschaftsänderungen wird es mit stärker geschlossenen Recyclingkreisläufen schwieriger, bestimmte Papiereigenschaften zu gewährleisten.

Altpapier enthält immer eine Mischung von verschiedenen Papierprodukten, sodass die dem Recycling zugeführten Fasern unterschiedlichen Altersgenerationen angehören, die teilweise erstmals (Primärfaserpapiere), mehrheitlich aber einer unbestimmten Anzahl bereits durchlaufener Recyclingzyklen (Papiere aus Altpapier oder Altpapieranteilen) angehören. In den letzten Jahren (2005-2019) hat sich in Deutschland das Produktionsportfolio zu Lasten der grafischen Papiere von 10,545 Mio. t in 2005 zu 7,1 Mio. t in 2019 (entspricht - 32,7 %) immer stärker in Richtung Verpackungspapiere und Karton von 8,5 Mio. t in 2005 zu 12,1 Mio. t in 2019 (entspricht + 41,6 %) verschoben [2]. Im Bereich der Verpackungspapiere ist in Deutschland die Altpapier-Einsatzquote traditionell besonders hoch. Wichtigstes Segment sind die zu 100 % aus Altpapierstoff hergestellten Wellpappenroh-papiere (9,0 Mio. t in 2019 [2]), die insgesamt einen Anteil von 74,5 % [2] der Produktion an Papier, Pappe und Karton für Verpackungszwecke ausmachen. Der Trend zu immer weniger grafischen Papieren und immer mehr Verpackungspapieren wird sich in Zukunft weiter fortsetzen, wodurch der Verpackungspapierkreislauf immer weniger durch Frischfasern aus dem grafischen Bereich aufgefrischt werden wird. Gleichzeitig wird das Problem durch den in Deutschland seit 1996 kontinuierlich gesunkenen Anteil der zur Faserauffrischung beitragenden importierten primärfaserhaltigen Wellpappenroh-papiere (Fluting und Kraftliner) von ursprünglich 26,6 % in 1996 auf 20,3 % in 2018 weiter verstärkt [3, 4].

Die bisher erfolgten und noch zu erwartenden Verschiebungen in der Produktions- und Verbrauchsstruktur von Papier verursachen grundsätzlich auch Veränderungen in der

Altpapierzusammensetzung. Der geringer werdende Anteil an Frischfaserpapieren hat insbesondere dort die stärksten Auswirkungen, wo die Recyclingkreisläufe bereits stark geschlossen sind, die Altpapier-Einsatzquoten demnach besonders hoch ausfallen. Dies ist insbesondere für Wellpappenrohapiere der Fall, wo seit Erfassung der spezifischen Altpapier-Einsatzquoten ab 1985 diese stets über 100 % und in 2018 bei 108 % lag [1]. Damit stellt sich die Frage, ob die Qualitätseigenschaften von Wellpappenrohapiere aus 100 % Altpapier sowie die daraus hergestellten Wellpappen auch bei weiteren Verschiebungen in der Altpapierzusammensetzung aufrechterhalten werden können und wie oft eine Faser für die Wellpappenherstellung recykliert werden kann?

## **1.2 Stand der Forschung und Entwicklung**

### **1.2.1 Überblick Recyclingzyklen allgemein**

Die typische Antwort auf die Frage, wie oft eine Faser recykliert werden kann, lautet meist 5 bis 7 Mal [5, 6]. Diese generelle Antwort impliziert, dass die Lebensdauer von Papierfasern begrenzt ist und damit Einweg-Papierverpackungen einen grundsätzlichen Nachteil im Vergleich zu Mehrwegverpackungen aufweisen. Diese Zahlen suggerieren auch, dass nach den genannten Recyclingzyklen die Fasern nicht mehr sinnvoll zur Papierherstellung genutzt werden können. Daher ist es notwendig, folgende Fragen zu beantworten:

- Ist die Anzahl maximaler Recyclingzyklen einer Faser korrekt wiedergegeben?
- Gelten diese Aussagen auch für Wellpappenverpackungen?
- Hat der Einsatz von Stärke bei der Papier- bzw. Wellpappenherstellung möglicherweise positive Effekte auf das Recyclingverhalten?
- Werden die Fasern bei der Wellenbildung geschädigt und wie oft kann Wellpappe recykliert werden?

Eine häufigere Nutzung von Papierfasern beim Rezyklieren von Wellpappenverpackungen wäre für die Nachhaltigkeit dieser Verpackungen grundsätzlich vorteilhaft.

Der Versuch die Frage zu beantworten, wie oft eine Papierfaser recykliert werden kann, hat an der TU Darmstadt eine lange Tradition. Bereits 1980 und 1997 wurden zwei Dissertationen von Stürmer [7] bzw. Hunold [8] am Institut für Papierfabrikation (IfP) durchgeführt, die sich mit genau dieser Thematik beschäftigten. Beide Arbeiten wurden zu dieser Zeit weltweit beachtet und stellten eine Art Prototyp für derartige

Untersuchungen dar. Die Modellierungen von Hunold wurden von Schabel et al. [9] 2004 aktualisiert.

Es ist hinlänglich bekannt, dass sich die Holzfasereigenschaften mit zunehmender Anzahl von Recyclingzyklen unterschiedlich entwickeln. Einflussnehmende Faktoren sind:

- Faserart (z. B. Nadelholz, Laubholz),
- Faseraufschlussverfahren (z. B. Holzstoff, Halbzellstoff, Sulfit- oder Sulfatzellstoff),
- Faservorbehandlung (z. B. Bleiche, Mahlung),
- Bedingungen des Recyclingprozesses (z. B. Zerfaserungsaggregat, Temperatur, Stoffdichte und Dauer der Zerfaserung, mit oder ohne Mahlung des Faserstoffs, Einsatz chemischer Additive),
- Blattbildungsbedingungen (z. B. Art der Blattbildungseinheit im Labor, mit oder ohne Rückwasserbetrieb bzw. Feinstoffrückführung),
- Nasspressbedingungen im Labor (z. B. angewandter Pressdruck und Einwirkdauer),
- Trocknungsbedingungen (Raumtemperatur mit oder ohne Schrumpfungsbegrenzung, Trocknung mit hoher Temperatur unter Vakuum).

Dazu gibt es zahlreiche publizierte Untersuchungsergebnisse, die in der Regel nicht direkt miteinander verglichen werden können, weil entweder die gewählten Randbedingungen nicht ausreichend beschrieben oder nicht vergleichbar sind [10-23]. Während z. B. das Recyclingverhalten von frischem Zellstoff untersucht wird, hat der international gehandelte, trockene Marktzellstoff bereits durch die Pressung und Trocknung zu Zellstoffbögen als gehandelte Zellstoffballen bereits einen Lebenszyklus hinsichtlich aller Trocknungseffekte hinter sich. In den entsprechenden Veröffentlichungen zum Thema Rezyklierbarkeit von Zellstoff ist häufig nicht beschrieben, ob die Autoren ihre Untersuchungen mit noch nie getrocknetem, flüssigem Zellstoff oder industriell getrocknetem Marktzellstoff begonnen haben. Ein anderer Aspekt betrifft die Trocknung von Laborblättern, die entweder nach TAPPI Standard T 205 bei Raumtemperatur oder nach ISO 5269-2 mit einem Rapid-Köthen Trockner mit Vakuum und einer Trocknungstemperatur von  $93 \pm 4$  °C durchgeführt werden kann. Ein systematischer Vergleich zum Einfluss der Trocknungsbedingungen auf die Papiereigenschaften beim Mehrfachrecycling ist nicht publiziert.

Dennoch ist es möglich, aus den vorliegenden Veröffentlichungen einige generelle Trends zum Recyclingverhalten von Faserrohstoffen abzuleiten. Die Mehrheit der

Untersuchungen erfolgte in den Dekaden 1970-79 und 1990-99 und bezieht sich auf Zellstoffe (Nadelholz, Laubholz sowohl gebleicht als auch ungebleicht) oder Holzstoffe wie SGW (Steinschliff), PGW (Druckschliff), TMP (Thermo-Mechanical Pulp), CTMP (Chemo-Thermo-Mechanical Pulp) oder CMP (Chemo-Mechanical Pulp). Leider werden in den allermeisten Publikationen neben den papiertechnologischen Grundparametern nur die für grafische Papiere relevanten Festigkeitskenngrößen untersucht und nur sehr selten die für Wellpappenrohapiere interessanten Festigkeitsparameter.

Nach Höke und Schabel [24] unterscheidet sich das Verhalten von Holzstoff- und Zellstofffasern, also ligninhaltigen bzw. ligninfreien Fasertypen, während des Mehrfachrecyclings grundsätzlich.

### 1.2.2 Recycling von Zellstoff

Für gemahlenen Zellstoff aus Laub- oder Nadelholz (gebleicht oder ungebleicht) sind die generellen Erkenntnisse mehr oder weniger identisch mit denen von gemahlenem Einjahrespflanzen-Zellstoff. Typischerweise wird mit zunehmendem Recycling eine Verschlechterung der Zugfestigkeit, der Berstfestigkeit und der Rohdichte festgestellt, während Weiterreißarbeit und Lichtstreuung zunehmen. Howard et al. [25] veröffentlichte Ergebnisse mit gebleichtem Marktzellstoff (Abbildung 1-1). Die Laborblätter aus Fichten-Sulfatzellstoff wurden gemäß TAPPI Blattbildungsverfahren ohne Hitzetrocknung hergestellt. Die größten Veränderungen der gemessenen Eigenschaften erfolgen in den ersten beiden Recyclingzyklen, während die folgenden drei Zyklen nur noch relativ geringfügige Änderungen verursachen. Ähnliche Ergebnisse wurden bereits in den 1970er Jahren publiziert [26, 27].

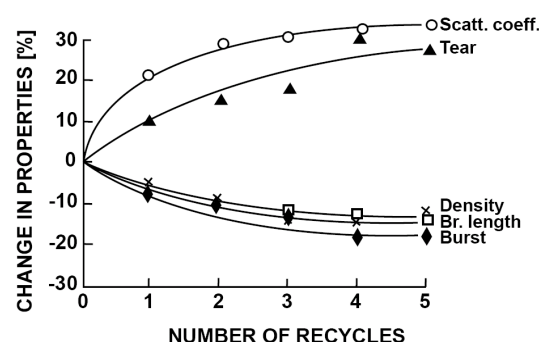


Abbildung 1-1: Eigenschaftsänderungen von gebleichtem Fichten-Sulfatzellstoff während des Recyclings [25]

Tabelle 1-1 zeigt Ergebnisse von Horn [26] für ungebleichten Südstaaten Kiefern-Sulfatzellstoff. In diesem Versuch wurde der Zellstoff des nullten Zyklus in flüssiger

Form bezogen und war damit vor seiner Verarbeitung nie getrocknet worden. Es wird deutlich, dass im 1. Zyklus, ausgehend von flüssigem Zellstoff (= Zyklus 0), der Festigkeitsverlust mit Abstand am größten ausfällt.

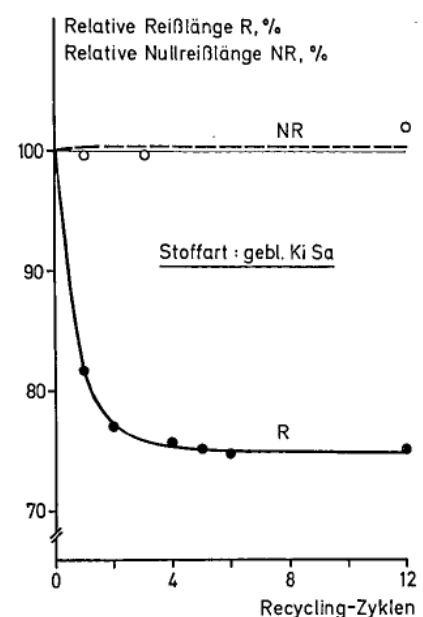
Tabelle 1-1: Zugfestigkeitsentwicklung von nicht getrocknetem ungebleichtem Kiefern-Sulfatzellstoff (gemahlen auf 285 ml CSF und mit 1 % Harzleimzusatz pro Zyklus) [26]

	<b>Zyklus 0</b>	<b>Zyklus 1</b>	<b>Zyklus 2</b>	<b>Zyklus 3</b>	<b>Zyklus 4</b>
Zugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	28,5	16,2	11,2	8,2	7,5

Industriell gekaufter Marktzellstoff hat bereits immer eine Trocknungsstufe durchlaufen. In den meisten experimentellen Studien wurde mit getrocknetem Marktzellstoff gearbeitet, weshalb im Vergleich zu Untersuchungen, die mit flüssigem, noch nicht getrocknetem Zellstoff begannen, meistens weniger signifikante Festigkeitsverluste beobachtet wurden.

Ein weiteres Beispiel zeigen Göttsching et al. [27] für gebleichten Kiefern-Sulfatzellstoff in Abbildung 1-2. Gezeigt ist die Reißlänge (R) und die Nullreißlänge (NR) über insgesamt 12 Recyclingzyklen. Der getrocknete Marktzellstoff wurde im Holländer vor der ersten Laborblattbildung auf 41 SR gemahlen. Zwischen den einzelnen Recyclingzyklen erfolgte keine Mahlung, weshalb der Mahlgrad vor dem 12. Recyclingzyklus, aufgrund der bei der Blattbildung auftretenden Feinstoffverluste, auf 35 SR gefallen war. Bereits nach dem 4. Zyklus wird das endgültige Festigkeitsniveau in Form der Reißlänge von ca. 75 % des Ausgangsniveaus erzielt. Die Nullreißlänge, die über die eigentliche Einzelfaserfestigkeit Auskunft gibt, bleibt dagegen über alle Recyclingzyklen konstant.

Abbildung 1-2: Veränderung der Reißlänge und Null-Reißlänge von Rapid-Köthen Laborblättern aus gemahlenem und gebleichtem Kiefern-Sulfatzellstoff in Abhängigkeit von der Recyclingzyklenanzahl [27]



Ergebnisunterschiede der verschiedensten Untersuchungen resultieren im Wesentlichen aus den Versuchsmaterialien und der Versuchsdurchführung. Neben Zellstoffsorte und Holzart liegen die Unterschiede in der Art des Ausgangsmaterials (getrocknet bzw. flüssig), der Durchführung der Mahlung (nur einmal vor dem ersten Zyklus oder zwischen jedem Recyclingzyklus), dem Mahlaggregat (Holländer, Valley Beater, Refiner), der Art der Laborblattbildung (mit oder ohne Kreislaufwasser, ohne starke Nasspressung und mit Vakuum oder mit Nasspressung und ohne Vakuum) und der Laborblatztrocknung (bei höherer Temperatur unter Vakuum oder ohne Vakuum bei Raumtemperatur). Diese Unterschiede können die dokumentierten Ergebnisse signifikant beeinflussen, wurden bisher allerdings nie systematisch vergleichend untersucht.

Trotzdem kann zusammengefasst werden, dass das Verhalten von Zellstoffen während des Recyclings viel stärker von Veränderungen im Faserbindungsvermögen beeinflusst wird als von der Faserfestigkeit (Nullreißlänge), da diese durch das Recycling kaum beeinträchtigt wird. Der Verlust an Faserbindungsvermögen kann durch einen Verlust an Wasserstoffbrückenbindungen oder eine Reduzierung der relativen Bindungsfläche verursacht sein. Nazhad [28] schrieb dazu, dass die "Verhornung" zum unbestrittenen Kandidaten zur Erklärung der Festigkeitsverluste von gemahlenen Zellstoffen geworden ist, der weltweit Anerkennung gefunden hat. Die Effekte dieser durch Trocknung hervorgerufenen „irreversiblen Verhornung“ von Zellstoff hat Jayme [29] bereits 1944 erstmals beschrieben.

### 1.2.3 Recycling von Holzstoff

Abbildung 1-3 zeigt relative Änderungen von Reißlänge und Weiterreißarbeit über 12 Recyclingzyklen für verschiedene Faserstoffe. Es ist deutlich zu erkennen, dass für den getesteten Holzschliff (gepunktete Linie) der Zugfestigkeitsverlust mit zunehmendem Recycling im Vergleich zu den untersuchten Zellstoffen deutlich niedriger ist (max. 5 %). Für den Parameter Weiterreißarbeit bewegt sich der Holzschliff auf dem Niveau beider Kiefern-Sulfatzellstoffe (KiSa, gebleicht bzw. ungebleicht). Der untersuchte Fichten-Sulfitzellstoff (FiSi) schneidet etwas besser ab, die beiden Laubholzzellstoffe (BuSi = Buchen-Sulfit- und BiSa = Birkensulfatzellstoff) deutlich schlechter.

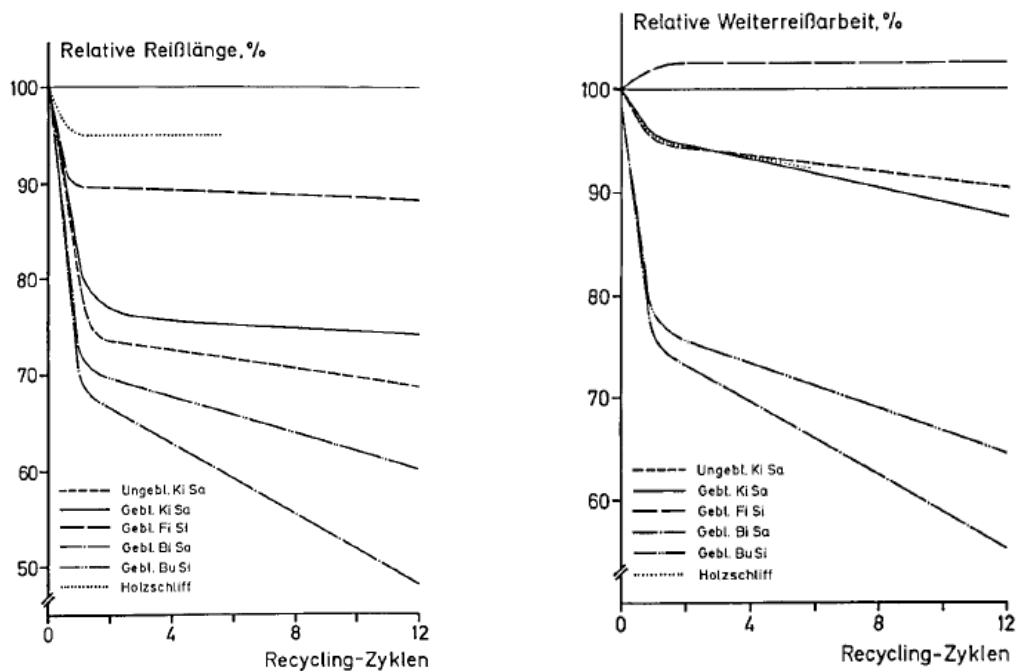


Abbildung 1-3: Relative Änderung von Laborblatteigenschaften Reißlänge und Weiterreißarbeit mit zunehmender Anzahl an Recycling-Zyklen [27]

Andere Autoren [30] haben für Holzstoffe ebenfalls geringere Änderungen der Eigenschaftskennwerte von Laborblättern mit zunehmender Recyclingzyklenanzahl ermittelt. Das Recycling-Verhalten dieser Faserstoffe ist damit als günstiger als die von chemisch aufgeschlossenem Zellstoff zu bewerten, der mit zunehmendem Recycling Festigkeitspotential verliert. Die relativen Änderungen von Eigenschaftskennwerten liegen nach Howard [25] für Steinschliff (SGW) in einem Bereich von  $\pm 10\%$ , für CTMP im Bereich von  $\pm 15\%$  (Abbildung 1-4) während sie für Zellstoff (vergl. Abbildung 1-1) bei  $\pm 25\%$  oder höher liegen.

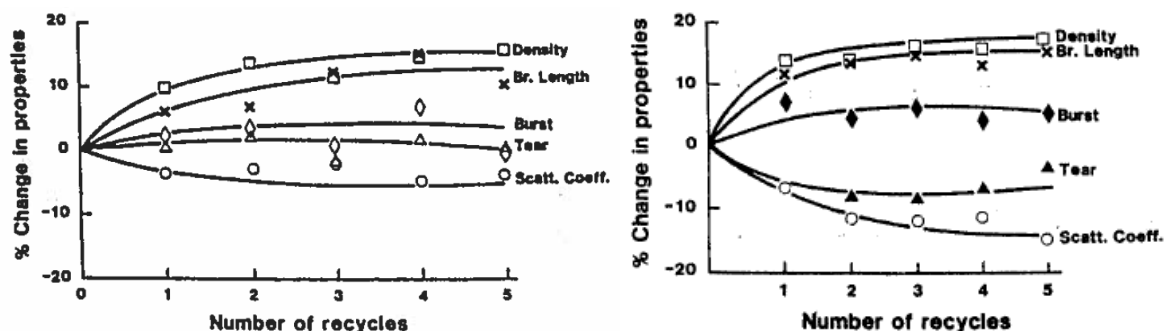


Abbildung 1-4: Veränderung von Laborblatteigenschaften mit steigender Anzahl an Recyclingzyklen für SGW (links) und CTMP (rechts) [25]

Die Steigerung von Zugfestigkeit und Rohdichte von ligninhaltigen Faserstoffen wird von einigen Autoren durch die zunehmende Abflachung der Fasern erklärt und ist mit mikroskopischen Aufnahmen von Blattquerschnitten vor und nach dem Recycling



belegt [25]. Der Blattquerschnitt von mehrfach rezyklierten TMP-Fasern ist dünner und die Abstände zwischen den Fasern sind geringer als bei den erstmals aus Frischfasermaterial hergestellten Blättern. Insgesamt führt dies zu einer höheren Bindungsfähigkeit des rezyklierten TMP-Blattes.

#### **1.2.4 Recycling von Halbzellstoffen**

Halbzellstoff wird im NSSC-Verfahren (Neutral Sulfite Semichemical) oder CMP-Verfahren (Chemo-Mechanical Pulp) mit Laub- oder Nadelhölzern hergestellt. Vor der Zerkleinerung werden die Hackschnitzel mit Natriumsulfit ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) und Natriumcarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) behandelt. Dadurch werden im Vergleich zu Zellstoff deutlich höhere (70 % - 85 %) und im Vergleich zu Holzstoff und CTMP (90 % - 96 %) niedrigere Ausbeutewerte erzielt [31]. Untersuchungen zum Recyclingverhalten von NSSC-Faserstoffen sind sehr selten. Eine Veröffentlichung von Law et al. [30] mit aufgeschlossenem Pappelholz mit 70 %, 80 % und 85 % Ausbeute weist im Vergleich zu Holzstoff auf eine stärkere, im Vergleich zu Zellstoff auf eine geringere Veränderung der Eigenschaftskennwerte hin. Die Autoren haben während des Recyclings keine Änderung in der Faserlänge und eine Zunahme der Null-Reißlänge für die CMP-Stoffe festgestellt. Insgesamt ist das Recyclingverhalten von Halbzellstoffen damit zwischen Zellstoff und Holzstoff einzuordnen.

#### **1.2.5 Recycling von grafischen Produkten**

In den 1990er Jahren wurde das Recyclingverhalten von Zeitungsdruckpapier von drei verschiedenen Forscherteams in Europa untersucht. Mehrfachrecycling-Experimente wurden bei der SCA in Sundsvall [32] im Labormaßstab, beim Institut für Papierfabrikation (IfP) [33] in Darmstadt im Pilotmaßstab und von einem Konsortium skandinavischer Papierunternehmen (SPC) [34] im halbtechnischen Maßstab an mehreren Orten in Europa durchgeführt. Die Experimente waren durch die immer stärkere Verbreitung der Zeitungsdruckpapierherstellung mit bis zu 100 % Altpapiereinsatz und den ersten kommerziellen Anwendungen von deinktem Altpapierstoff in SC- und LWC-Papieren getrieben. Die Frage war aufgeworfen worden, ob durch die zunehmende Verwendung von Sekundärfaserstoff im grafischen Bereich bei der Zeitungsdruckpapierherstellung zukünftig Qualitätsprobleme zu erwarten sind. Die für alle drei Mehrfachrecycling-Versuche geltenden Randbedingungen waren die Nutzung von Primärfaserstoff für die erstmalige Papierherstellung, Satinage und Bedrucken des Papiers sowie die Stoffaufbereitung des bedruckten Materials mit einer

Deinking-Flotationsstufe (SCA & IfP) bzw. zwei Flotationsstufen (SPC) zur Druckfarbenentfernung. Bei den Versuchen von IfP und SPC wurde der durch die Flotation entstandene Ascheverlust durch Zugabe von Frischfüllstoff bei der Papierherstellung ausgeglichen. In allen Versuchsreihen wurden keine Frischfasern zugeführt.

In Abbildung 1-5 sind von dem IfP-Versuch sowohl die relativen Änderungen der Faserstoffeigenschaften Schopper-Riegler-Wert (SR) und Wasserrückhaltevermögen (WRV) als auch der Papiereigenschaften Rohdichte, Reißlänge, Fortreißfestigkeit und Weißgrad dargestellt. Sie zeigt die erwartete Zunahme des Schopper-Riegler-Wertes (+27 %) und die Abnahme des WRV-Wertes (-17 %) über 5 Recyclingzyklen, beginnend mit der Frischfaserpapierherstellung beim Recyclingzyklus 0. Die Rohdichte steigt mehr oder weniger linear über die 5 Recyclingzyklen um +9 %, während die Reißlänge annähernd konstant bleibt. Die Weiterreißarbeit fällt bis zum Ende der Zyklen um -17 %, reduziert sich aber erst nach dem 3. Recyclingzyklus deutlich. Der Weißgradverlust nach dem Deinken erreicht in Summe -18 %, wobei bereits nach dem ersten Zyklus ein Verlust von -11 % eintritt. Die nachfolgenden Recyclingzyklen führen lediglich zu einem weiteren Weißeverlust von 7 %-Punkten. Dies führte schließlich unter Berücksichtigung der Herkunft und Mischung von Druckerzeugnissen im deutschen grafischen Altpapier zu der generellen Schlussfolgerung, dass in Zukunft kein Recyclingkollaps zu erwarten ist [33].

Einhelliges Fazit aller drei Versuchsserien war, dass das nach 4 (SCA) bzw. 5 (IfP, SPC) Recyclingzyklen hergestellte Papier qualitativ noch gut war und auch bedruckt werden konnte. Allerdings war nach dem jeweils letzten Zyklus keine ausreichende Papiermenge mehr vorhanden um einen erneuten Stoffaufbereitungs- und Papierherstellungszyklus durchzuführen. Dies war der Tatsache geschuldet, dass während des Recyclings kein zusätzliches Fasermaterial (weder Primär- noch Sekundärfasern) zugeführt wurde und in allen Versuchen durch Ausschuss, Randbeschnitt, Restmaterial in Bütten und Pumpen die Verluste größer als bei etablierten Industrieprozessen ausfielen. Das Papier aus dem 5. Recyclingzyklus erfüllte also noch die notwendigen Anforderungen, obwohl das Alter aller Fasern in diesen Modellversuchen bereits bei 5 lag.

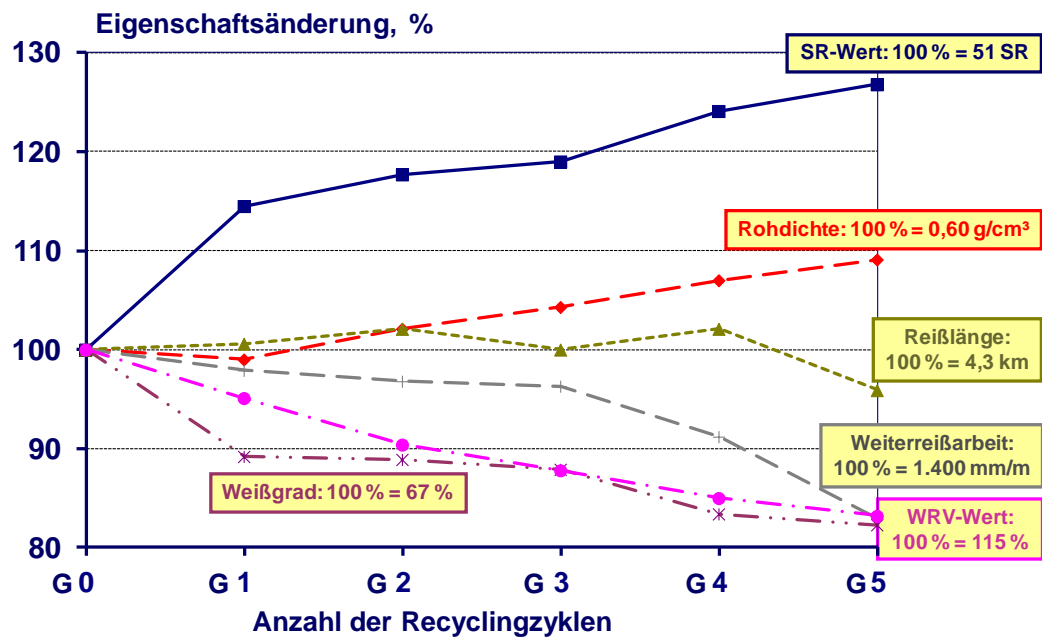


Abbildung 1-5: Relative Änderung von Eigenschaften während des Mehrfachrecyclings von Zeitungen am IfP (Festigkeitseigenschaften sind Mittelwerte von CD und MD Messungen) [8]

### 1.2.6 Recycling von Verpackungsprodukten

Das einzige Forschungsprojekt das sich mit dem Mehrfachrecycling von Wellpappe beschäftigt hat, wurde bereits 1975 von Koning und Godshall [35] durchgeführt. Sie produzierten Wellpappenschachteln aus Frischfaserpapieren (Kraftliner und Halbzellstoff-Fluting) und aus diesen nach dem Recycling der Schachteln wiederum Wellpappenrohapiere - allerdings leider nur mit 3 Recyclingumläufen. Ziel war es, den Einfluss des Mehrfachrecyclings auf die Festigkeitseigenschaften der Wellpappeschachteln zu ermitteln. Abbildung 1-6 zeigt schematisch den Versuchsaufbau. Da die Veröffentlichung auch Angaben zu Festigkeitskenngößen der Wellpappenpapiere enthält, wie z. B. Steifigkeit, Durchstoßarbeit, FCT (Flat Crush Test) oder ECT (Edge Crush Test), können die Werte für Vergleiche herangezogen werden.

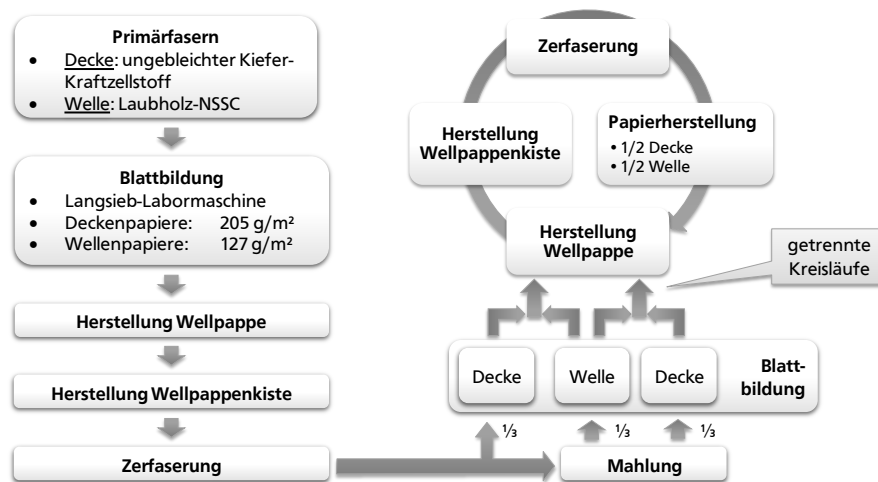


Abbildung 1-6: Schematischer Versuchsaufbau nach Koning und Godshall [35]

### 1.2.7 Nicht ausreichend berücksichtigte Mehrfachrecycling-Aspekte

Altpapierhaltige Wellpappenrohapiere (WPRP) wie Testliner, Schrenz und Wellenstoff sowie Zeitungsdruckpapier haben die Gemeinsamkeit, dass sie in Deutschland mit den höchsten Altpapier-Einsatzquoten (108 % bzw. 107 %) hergestellt werden [36]. Aber im Gegensatz zu dem deutlich besser untersuchten Zeitungsdruckpapier werden nicht nur andere Altpapiersorten zur Herstellung verwendet, sondern es erfolgt bei der Herstellung von Wellpappenrohapiere durch den Einsatz von Stärke (in der Masse oder in Film- oder Leimpresse) eine signifikante Festigkeitssteigerung, die für die Qualität der erzeugten Papiere entscheidend ist. Bei der Herstellung von Wellpappe wird ein zweites Mal Stärke zur Verklebung der einzelnen Papierlagen verwendet. Dabei wird in der Wellpappenanlage sowohl in der sog. Heiz- und Zugpartie für die Trocknung des Stärkeklebstoffes zusätzliche Wärme übertragen, als auch in den für das Formen der Wellen erforderlichen Maschinenteilen (Vorheizer und sog. Single Facer). Die Einflüsse der Trocknungstemperaturen auf die Entwicklung der Festigkeitseigenschaften während des Mehrfachrecyclings sind in einigen wenigen Studien untersucht. Hierbei wurde allerdings nicht auf die zusätzlichen Belastungen der Fasern in der Wellpappenanlage und auch nicht auf die für Wellpappenpapiere relevanten Festigkeitskenngrößen wie SCT (Short Compression Test), RCT (Ring Crush Test), CMT (Concora Medium Test) oder Berstdruck, sondern auf die für grafische Papiere relevanten Parameter Reißlänge und Weiterreißarbeit eingegangen [37]. Über den Einfluss von Stärkeapplikationen beim Mehrfachrecycling sind keine Veröffentlichungen zu finden. Lediglich in zwei Veröffentlichungen wird der Einfluss von Leimungsmitteln im Recyclingkreislauf

behandelt [26, 38]. Borchers et al. [39] haben das Verhalten von Stärke im Industriemaßstab untersucht und nachgewiesen, dass die im Altpapier enthaltene Stärke bei der Papierherstellung zumindest teilweise durch die Zugabe kationischer Stärke wieder aktiviert werden kann.

Die Auswirkungen der mechanischen Belastungen bei der Wellpappenherstellung auf das Mehrfachrecycling sind ebenfalls nicht untersucht. Stürmer et al. [40] untersuchten 4 Wellenpapiere in einer einseitigen Pilot-Wellpappenmaschine ohne Verklebung und fanden heraus, dass durch die Beschleunigung beim Wellenformen und die Axialkräfte Faserkürzungen auftreten, die sich in einer geringen Abnahme der Weiterreißarbeit niederschlagen. Die Effekte von Geschwindigkeit und Liniendruck sind größer als die der Temperatur. Primärfaserpapiere waren stärker betroffen als Sekundärfaserpapiere und ein Mehrfachrecycling wurde nicht untersucht. Daraus resultiert, dass in dem hier vorliegenden Mehrfachrecycling-Projekt folgende Einflüsse speziell zu untersuchen sind, bevor umfangreiche Mehrfachrecycling-Versuche im Pilotmaßstab erfolgen:

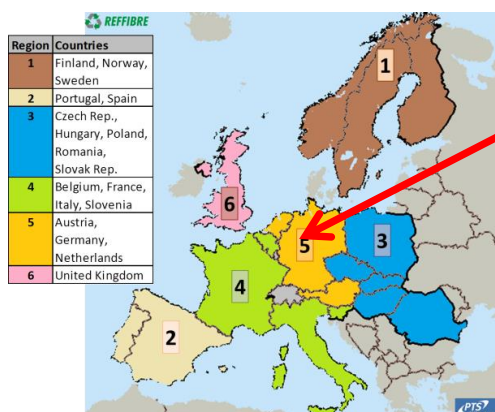
- Stärkeeinsatz zur Festigkeitssteigerung von altpapierhaltigen Wellpappenrohpapieren (WPRP)
- Verwendung von Stärke zur Verklebung der Wellpappe
- Einfluss physikalischer Kräfte auf das Wellenpapier bei seiner Umformung in der Wellpappenanlage und mögliche Faserschädigungen
- Zusätzlicher Temperatureinfluss mit ggf. weiteren Verhornungseffekten in der Wellpappenanlage zur Wellenumformung und Stärke-Verkleisterung.

#### **1.2.8 Faseralter und Faserumläufe**

Das Alter einer Papierfaser kann bisher weder durch physikalische noch durch chemische Messmethoden bestimmt werden. Es gibt jedoch Modelle zur Berechnung eines mittleren Faseralters bzw. der Verteilung der Altersstruktur. Um derartige Berechnungen durchführen zu können, sind im Wesentlichen die Ex- und Import-Mengenströme der relevanten Papiere und Papierprodukte, die Altpapier-Einsatzquoten sowohl der nationalen als auch der importierten relevanten Papiersorten und die Zusammensetzung der verwendeten Altpapiersorten zu berücksichtigen. Erste Berechnungen hierzu wurden von Hunold et al. [41] bereits 1993 für den Bereich altpapierhaltiger Zeitungen vorgestellt. Für den Bereich der Wellpappenpapiere ist die Modellierung wegen unbekannter Ex- bzw. Importmengen an befüllten Verpackungen ungleich schwieriger. Gleichwohl wurde für deutsche Wellpappenpapiere für 1991 ein mittleres Generationenalter von 1,9 berechnet. Mit entsprechenden Prognosen ist

nach diesen Berechnungen bis zum Jahr 2000 eine Steigerung auf ein mittleres Generationenalter von 2,6 zu erwarten gewesen [41].

Meinl et al. [42] haben 2015 ein Modell für das mittlere Faseralter über Fasermengenstrombilanzierungen publiziert, das Zeitungen (NP=newsprint), andere grafische Papiere (OGP=other graphic paper), Wellpappenrohapiere (CM=case materials) und Karton (OB=other board) berücksichtigt (Abbildung 1-7). Es wurde für Wellpappenrohapiere der zentraleuropäischen Region (Nr. 5: Deutschland, Niederlande und Österreich) in 2014 ein durchschnittliches mittleres Faseralter von 3,41 ermittelt. Nichtsdestotrotz sind das mittlere Faseralter bzw. die Faseraltersverteilungsfunktionen einerseits nur Zahlenwerte, die von vielen Annahmen abhängen. Andererseits können sie keinesfalls die Frage nach der Qualität des Fasermaterials beantworten, geschweige denn wie oft diese Fasern noch rezykliert werden können bzw. wie hoch die maximal mögliche Umlaufzahl von Fasern ist.



5		Ash		Fibre Age	
Paper products	NP	16%		2,65	
	OGP	26%		1,51	
	CM	18%		3,41	
	OP	22%		2,58	
P/R grades	Mixed	22%		2,32	
	OCC	21%		2,74	
	ONM	23%		1,84	

Abbildung 1-7: Mittleres Faseralter und Aschegehalt verschiedener Papierproduktgruppen und Altpapiersorten für Deutschland, Österreich und die Niederlande in 2014 nach Meinl [42]

### 1.3 Arbeitshypothese

Die Arbeitshypothese des Projektes lautet, dass das Fasermaterial aus Wellpappenschachteln sich häufiger rezyklieren lässt als es die Berechnungen zum mittleren Faseralter bisher suggerieren. Es soll die Anzahl der möglichen Recyclingumläufe ermittelt werden, die eine Wellpappenkiste ohne signifikante Qualitätseinbußen erreichen kann. Aufgrund der oben dargestellten Vorüberlegungen wird davon ausgegangen, dass von der Wellpappenherstellung mit seiner mechanischen Papierumformung und der thermischen Belastung kein signifikanter negativer Einfluss auf das Recyclingverhalten des Fasermaterials ausgeht. In ersten Tastversuchen am PMV

wurden an zwei Proben die Eigenschaften von Suspensionen und Laborblättern geprüft. Zum Einsatz kamen jeweils industriell gefertigte Wellpappe und die dafür verwendeten Rohpapiere. Ein Vergleich der Suspension von zerfaserter Wellpappe und der zugehörigen Papiermischung sowie der jeweiligen Blatteigenschaften daraus hergestellter Laborblätter zeigte keine signifikanten Unterschiede. Eine generelle Gültigkeit dieser Hypothese muss aber noch verifiziert werden.

Mit dem skizzierten Lösungsweg soll der Einfluss des Mehrfachrecyclings von Wellpappe unter besonderer Berücksichtigung der papierspezifischen Herstellungsverfahren (Stärkeapplikation) und den papierphysikalischen Eigenschaften (z. B. SCT, RCT, CMT, Berstdruck) sowie den Einflüssen der Wellpappenfertigung (Wellen-bildung, Wellpappenverklebung und Trocknung) experimentell untersucht werden.

## 2 Forschungsziel und Lösungsweg

### 2.1 Forschungsziel

Wellpappenschachteln konkurrieren national und international mit anderen Transportmaterialien aus beispielsweise Kunststoff, Metall oder Holz. Letztere können als Mehrwegverpackungen konzipiert sein und haben im Gegensatz zu Einwegverpackung aus Wellpappe häufig ein positiveres ökologisches Image. Wellpappenschachteln sind üblicherweise Einwegverpackungen, werden nur einmal benutzt und danach dem Recyclingkreislauf als Sekundärrohstoff der Papierindustrie zugeführt. Mit Beantwortung der Frage "Wie oft kann eine Wellpappen-Papierfaser rezykliert werden?" stellt sich die deutsche Wellpappenroh papier herstellende Papierindustrie den Herausforderungen der Zukunft zur Sicherstellung der Produktion qualitativ hochwertiger Wellpappenroh papiere sowie der daraus hergestellten Wellpappen. Somit können ggf. geeignete Maßnahmen entwickelt werden, um Papierqualitätsstandards trotz Verschiebungen in der Altpapierzusammensetzung zu erhalten.

Die Projektergebnisse können insbesondere von der Papier- und Wellpappenindustrie, den Altpapierhändlern und Ingenieurbüros sowie von Institutionen, die Ökobilanzierungen oder Lebenszyklusanalysen durchführen und von Entscheidungsträgern für die Formulierung von Anforderungen an Transportverpackungen genutzt werden. Der Kreis der Projektbegleiter bildet wesentliche Teile der gesamten Papierkette ab und schafft damit eine Verbreitung der neu erarbeiteten Erkenntnisse in weite Teile der Branche.

Mit der Kenntnis um die maximal mögliche Anzahl an Recyclingzyklen einer Papierfaser im Bereich von Wellpappentransportverpackungen, können Veränderungen im Konsumverhalten von Papierprodukten gelassener entgegengesehen und Gegenmaßnahmen können ggf. rechtzeitig eingeleitet werden. Außerdem können die Ergebnisse für weiterführende Lebenszyklusanalysen genutzt und so insbesondere zum Vergleich von Mehrweg- mit Einwegtransportverpackung verwendet werden. Besonders im Bereich der Wellpappe erzeugenden Industrie sind in Deutschland sehr viele KMU's vertreten. Laut Auskunft vom Verband der Wellpappen-Industrie e. V. (VDW) sind 68 % ihrer Mitglieder KMU-Betriebe.

Die wirtschaftliche Aufbereitung des Rohstoffs Altpapier sichert das Papierrecycling, erhält die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Papierindustrie und leistet damit einen



Beitrag zur Erreichung volkswirtschaftlicher, ökologischer und gesellschaftlicher Ziele. Die Erhaltung der Konkurrenzfähigkeit hat durch die Bewahrung und Schaffung von Arbeitsplätzen positive soziale Auswirkungen. Davon profitieren nicht nur die Papier- und Wellpappenindustrie, sondern in ihrem Umfeld auch zahlreiche kleine und mittelständische Ingenieurbüros als KMU, die Projektierungsarbeiten übernehmen sowie Firmen, die für die Erfassung und Sortierung von Altpapier und im Transportwesen tätig sind. Das Recycling schont die Ressourcen der Papierrohstoffe, Energie und Wasser, was in erheblichem Umfang zur Nachhaltigkeit des Papierkreislaufs beiträgt. Der geplante Nachweis, dass Wellpappenverpackungen auf Altpapierbasis ohne signifikante Probleme mehrfach rezykliert werden können, liefert den quantitativen Nachweis, dass bestehende Standards und gesetzliche Auflagen in diesem Bereich erfüllt werden können.

## **2.2 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels**

Das Mehrfachrecycling von Wellpappe ist trotz seiner enormen Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft weltweit unzureichend erforscht. Daher werden mit dem Forschungsvorhaben die Möglichkeiten und Grenzen des Recyclings von Wellpappe ermittelt. Die Arbeitspakete werden entlang den für das Mehrfachrecycling zu erwartenden relevanten Prozessschritte abgearbeitet. In den Laborsimulationen wird grundsätzlich ohne die Wellpappenverarbeitungsschritte (z. B. Drucken, Kaschieren, Kleben, Klammern) gearbeitet, sodass auf die klassischen Reinigungsmaßnahmen der Altpapieraufbereitung verzichtet werden kann.

Zielgrößen der zu bewertenden Papiere sind gemäß CEPI Container Board [43] die Festigkeitskenngrößen Berstfaktor und SCT für Liner sowie CMT, RCT und SCT für Wellenpapiere. Der derzeit stark diskutierte S-Test [44] wird als Messparameter mit aufgenommen, da das Fachgebiet PMV bereits über das erforderliche Messgerät verfügt.

Die aus heutiger Sicht auf das Mehrfachrecycling von Wellpappe einflussnehmenden Verarbeitungsschritte sind in Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2 farblich hervorgehoben. Die Blockschemata zeigen die Wellpappenrohpapierherstellung auf Sekundärfaserbasis und die Wellpappenerzeugung. Bei der Herstellung von Wellpappenrohpapier auf Frischfaserbasis ist die Stoffaufbereitung zwingend um eine Mahlungsstufe zu erweitern, die in der Altpapieraufbereitung lediglich eine Option darstellt. Diese relevanten Verarbeitungsprozesse müssen in den geplanten Simulationsversuchen im Labor- oder Pilotmaßstab nachgestellt werden.



Abbildung 2-1: Prozessschema zur Herstellung von Wellpappenrohpaper auf Altpapierbasis

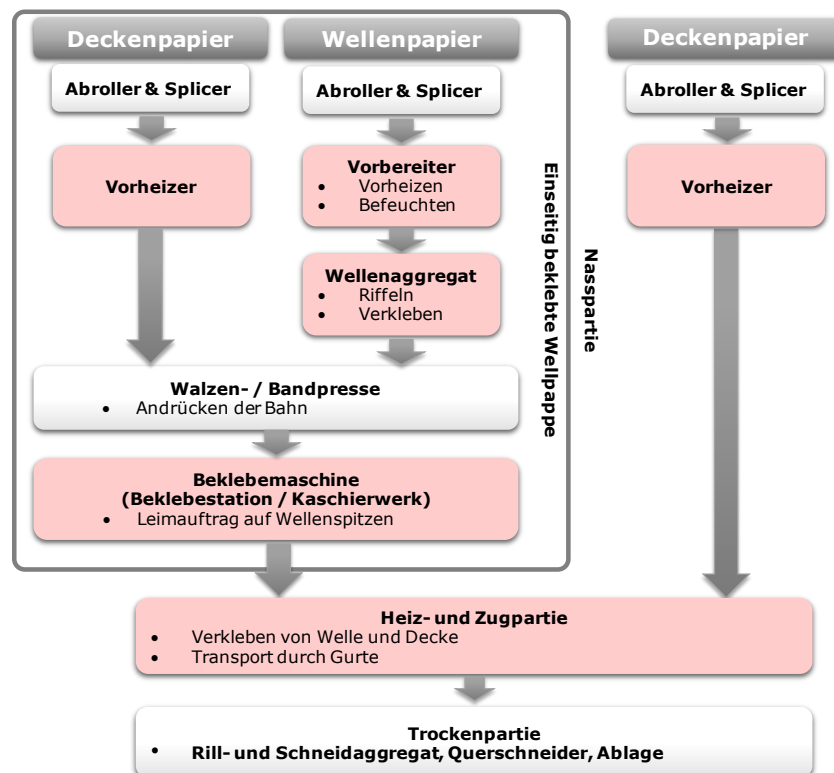


Abbildung 2-2: Prozessschema Wellpappenherstellung (einwellig)

Basierend auf dem aktuellen Kenntnisstand werden die Untersuchungen zum Mehrfachrecycling wie folgt durchgeführt:

1. Untersuchung, ob der Fasertyp einen Einfluss auf das Verhalten beim Mehrfachrecycling hat (AP 1; Labormaßstab).
2. Untersuchung zum Einfluss des für die Wellpappenherstellung erforderlichen Stärkeauftrags und der Zerfaserungsbedingungen (AP2; Labormaßstab)

3. Untersuchung des Einflusses der Wellpappenherstellung auf die Papiereigenschaften (AP 3; Industrie- und Pilotmaßstab, da keine Labormethoden bekannt).
4. Pilotversuch zum Mehrfachrecycling, bei dem alle in den Arbeitspaketen 1-3 als für das Mehrfachrecycling relevanten Schritte berücksichtigt werden (AP 4; Pilotmaßstab).

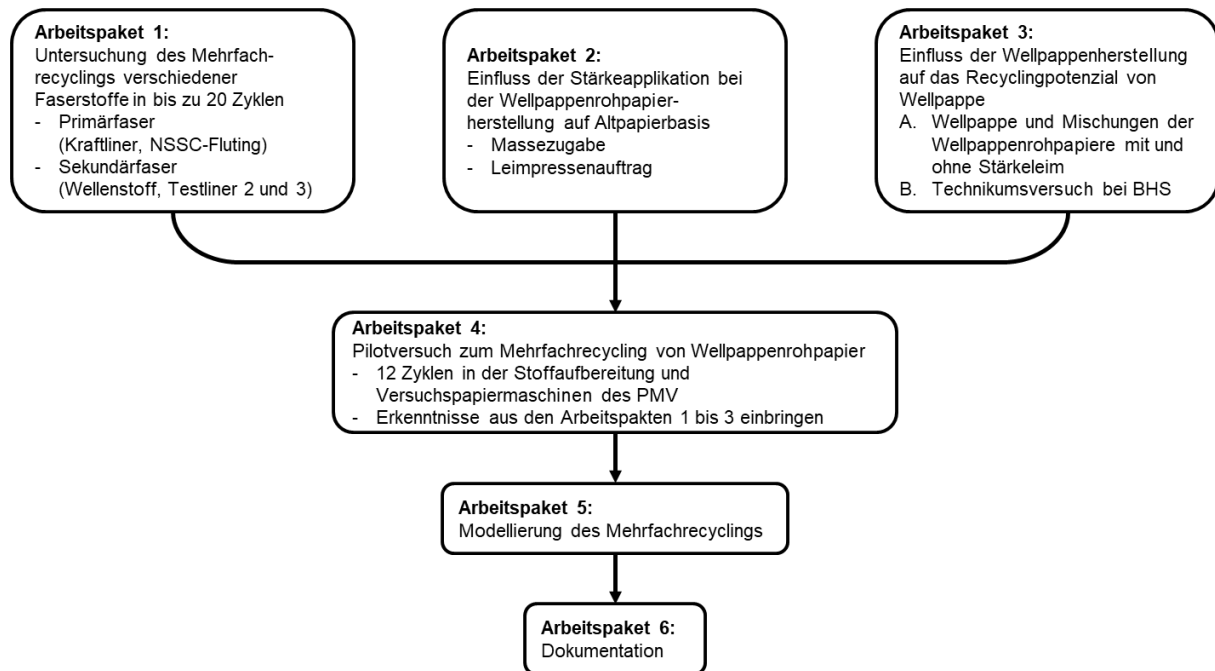


Abbildung 2-3: Projektplan

### 2.2.1 Arbeitspaket 1: Untersuchung des Mehrfachrecyclings verschiedener Faserstoffe

Im ersten Schritt wird das Mehrfachrecycling-Verhalten verschiedener Faserstoffe mit einfachen Laborsimulationen untersucht. Eingesetzt werden für die Wellpappenherstellung typische Kraftliner und Fluting (2 Primärfaserpapiere) und drei altpapierhaltige Papiere (2 Testliner und 1 Wellenstoff). Die Zerfaserung erfolgt jeweils im LC-Pulper unter konstanten Bedingungen. Danach werden Laborblätter mit Rückwasser gebildet um Feinstoffverluste zu minimieren und die Trocknung nach Rapid-Köthen durchgeführt. Beobachtete Zielgrößen sind neben den üblichen Papiergrundeigenschaften insbesondere die für Wellpappenpapiere relevanten Festigkeitskenngrößen wie SCT, RCT, CMT oder Berstdruck. Es sind mindestens 20 Recyclingzyklen geplant.

### **2.2.2 Arbeitspaket 2: Einfluss von Zerfaserungsbedingungen und Stärkeapplikationen bei der Wellpappenroh papierherstellung auf Altpapierbasis**

In diesem Arbeitspaket wird untersucht, welchen Einfluss die Zerfaserungsbedingungen mit höheren Scherkräften in einem Niederkonsistenzpulper anstelle des Standarddesintegrators auf Frischfasermaterial und die Stärkeapplikationen bei der Papierherstellung in jedem Recyclingzyklus auf die Festigkeitsentwicklung von Testliner 3 haben. Für die Zerfaserung des Frischfaserpapiers (Kraftliner) in einem Niederkonsistenzpulper wird ein vorhandener Laborpulper so umgebaut (in der Größe verkleinert), dass das für die Recyclingzyklen notwendige Material in bis zu zwei Chargen zerfaseret werden kann. Für den Pulperbau wird am PMV vorhandenes Werkstattpersonal eingesetzt. Die Zerfaserung erfolgt vergleichend im Standarddesintegrator und im Neubau des Laborpulpers.

Die Ergebnisse mit Stärkezugabe können mit dem gleichen Faserstoff aus AP 1 verglichen werden. Die Anwendung von Stärke erfolgt in zwei Versuchsserien. Einerseits durch Massezugabe nach dem Zerfasern bei jedem Recyclingzyklus und andererseits durch Stärkeauftrag mittels einer vorhandenen Einlehner-Laborleimpresse auf die hergestellten Laborblätter. Damit wird sichergestellt, dass basierend auf den Versuchsergebnissen Aussagen zum Verhalten von Stärkeapplikationen bei der altpapierhaltigen Wellpappenroh papierherstellung getroffen werden können. Die Zielgrößen der Prüfeigenschaften bleiben identisch zu AP 1.

### **2.2.3 Arbeitspaket 3: Einfluss der Wellpappenherstellung auf das Recyclingpotential von Wellpappe**

In fünf verschiedenen Wellpappenanlagen werden Proben von den verwendeten Wellpappenroh papieren und dem fertigen Wellpappenbogen sowie dem verwendeten Stärkeleim genommen. Untersucht werden die hergestellten Wellpappen, die sich hinsichtlich ihrer Konzeption (ein- bzw. zweiwellig), des Wellenprofils (B-, C-, D-, E-Welle) und den eingesetzten Papiersorten (Frischfaserpapier als Kraftliner bzw. Fluting oder Sekundärfaserpapier als Testliner bzw. Wellenstoff) unterscheiden sollen. Die Proben (fertige Wellpappe bzw. massegleiche Wellpappenroh papiermischungen mit und ohne Stärkeleim) werden jeweils unter konstanten Bedingungen zerfaseret, Laborblätter mit Rückwasser hergestellt und Festigkeitskenngrößen bestimmt. Die vergleichende Bewertung der Ergebnisse (Suspensions- und Blatteigenschaften) wird

Aufschluss darüber geben, welche Auswirkungen die Wellpappenherstellung mit ihren thermischen und mechanischen Belastungen auf das Festigkeitsniveau daraus hergestellter neuer Papiere hat.

In separaten Pilotversuchen werden verschiedene industriell hergestellte Wellenpapiere (Frischfaser- bzw. Sekundärfaserpapier unterschiedlicher Flächenmassen) unter Variation von Betriebsbedingungen (Temperatur, Geschwindigkeit, Feuchtigkeit) zu einseitiger Wellpappe verarbeitet. Die verarbeiteten Papiere werden im Vergleich zu den nicht umgeformten Papieren im Labor aufbereitet, die Fasern hinsichtlich Faserlängenverteilung bzw. Faserschädigungen untersucht und zu Laborblättern verarbeitet, die auf die üblichen Festigkeitskenngößen untersucht werden. Auf der Pilot-Wellpappenanlage (1 m Arbeitsbreite) kann in Einzelversuchen auch auf die Verwendung von Stärke zur Verklebung verzichtet und damit deren Einfluss beim Recycling herausgearbeitet werden.

#### **2.2.4 Arbeitspaket 4: Pilotversuch zum Mehrfachrecycling von Wellpappenrohpapier**

Für den Pilotversuch zum Mehrfachrecycling von Wellpappenrohpapier wird das Stoffaufbereitungstechnikum und die Versuchspapiermaschine am PMV genutzt. In Vorversuchen ist zunächst die Fahrweise der Maschine mit möglichst geringen Verlusten zu optimieren, sodass im nachfolgenden Mehrfachrecyclingversuch aus der vorgegebenen Masse an Ausgangsmaterial möglichst viele Papierherstellungszyklen durchlaufen werden. Es sollen mindestens 12 Recyclingzyklen angestrebt werden. Aus den Arbeitspaketen 2 und 3 resultieren Erkenntnisse, welche weiteren Prozessschritte neben der Stoffaufbereitung und der Blattbildung signifikanten Einfluss auf die Papiereigenschaften haben (z. B. Stärkeauftrag oder Erhitzen in der Wellpappenmaschine). Diese Prozessschritte werden dann durch entsprechende Simulation im Pilotversuch berücksichtigt. Neben der Erfassung der relevanten papierspezifischen Kenndaten und den relevanten Festigkeitskenngößen werden auch die Suspensionseigenschaften (SR-Wert, WRV, Faserlängenverteilung und Faserfraktionen) erfasst.

#### **2.2.5 Arbeitspaket 5: Modellierung des Mehrfachrecyclings**

Basierend auf den Erkenntnissen der ersten vier Arbeitspakete wird unter Nutzung vorhandener Modellierungssoftware für grafische Papiere das Verhalten von Wellpappenrohpapieren beim Mehrfachrecycling beschrieben. dadurch werden

Aussagen möglich, wie häufig Wellpappe rezykliert werden kann. In Verbindung mit den in Deutschland existierenden Masseströmen verschiedenster Papierprodukte erfolgt eine Abschätzung des mittleren Faseralters und des zukünftigen Nutzungspotentials von Wellpappenrohpaper bzw. Wellpappe.

#### **2.2.6 Arbeitspaket 6: Dokumentation**

Die in den Arbeitspaketen 1 bis 5 erhobenen Daten, erarbeiteten technischen Lösungen und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen werden in Zwischen- und Abschlussberichten nachvollziehbar und durch Dritte wiederholbar dokumentiert. Die in Kapitel 7 genannten Transfermaßnahmen wie z. B. Fachvorträge und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften wurden und werden umgesetzt.

#### **2.3 Personaleinsatz**

Für die Recherche, die Entwicklung der Versuchspläne sowie die Auswertung der Versuche, Evaluation der Versuchsergebnisse und die Kostenbetrachtungen war der wissenschaftliche Mitarbeiter des PMV (TU Darmstadt) zuständig. Ihm unterlag auch die wissenschaftliche Leitung. Die routinemäßige Durchführung von Laborversuchen oblag dem Laborpersonal der Forschungsstelle. Für diverse Hilfstätigkeiten im Labor und bei der Auswertung war eine studentische Hilfskraft vorgesehen.

Die geleistete Arbeit des wissenschaftlich-technischen Personals (A.1, HPA A) von insgesamt 20 Personenmonaten über die gesamte Laufzeit des Vorhabens, inklusive der viermonatigen Verlängerung, entsprechen den beantragten Mitteln und waren für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. Gleiches gilt für die geleistete Arbeit des übrigen Fachpersonals und der Hilfskräfte.

Es wurden keine Leistungen oder Geräte Dritter in Anspruch genommen, die mit finanziellem Aufwand verbunden waren.

### 3 Material, Geräte und Prüfmethode

#### 3.1 Rohstoffe und Materialien

##### Wellpappenrohapiere

Im Rahmen der AP 1 und 2 wird das Mehrfachrecycling verschiedener Wellpappenrohapiere untersucht. Die in der Wellpappenherstellung eingesetzten Papiere sind vorrangig Recyclingmaterialien wie Testliner (TL) 2 und 3 sowie Wellenstoff (WS). Die Anzahl an Recyclingzyklen dieser Fasern ist unbekannt. Recyclingpapiere stellen mit knapp 80 % den mit Abstand größten Beitrag der zur Wellpappenherstellung eingesetzten Papiere. Die übrigen 20 % auf Frischfaserbasis bestehen überwiegend aus Kraftliner und geringen Mengen Fluting. Jedoch haben auch dieser Papiere in den Untersuchungen bereits den ersten Papierlebenszyklus absolviert. Für die beiden Frischfasermaterialien konnten die jeweiligen Suspensionsproben vor der ersten Verarbeitung zu Papier beschafft und untersucht werden. Um das Spektrum aus Frischfaserpapier und altpapierhaltigen Papieren abzudecken, werden fünf Wellpappenrohapiere getrennt im Mehrfachrecycling untersucht. Zusätzlich zu den einzelnen Rohpapieren, wurde eine Mischung dieser Rohpapiere aus 20 % KL, 40 % TL3 und 40 % WS (lutro Gewichtsanteile) untersucht (Abbildung 3-1). Diese Mischung entspricht in etwa den Mengenanteilen der für die deutsche Wellpappenproduktion im Jahr 2018 verbrauchten Papiere.

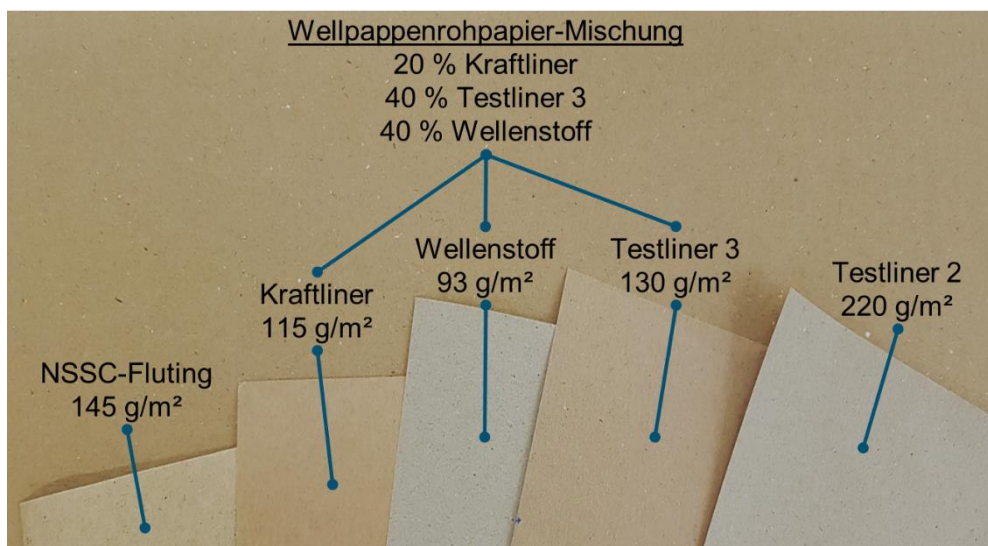


Abbildung 3-1: Wellpappenrohapiere für Arbeitspaket 1, 2 und 4

Für die Versuche in Arbeitspaket 3 B wurden die in Tabelle 3-1 gelisteten Wellpappenroh-papiere eingesetzt.

Tabelle 3-1: Wellpappenroh-papiere für die Untersuchungen auf der Pilotwellpappenanlage in AP 3 B

Material		Einordnung nach	Flächenbezogene
		Cepi Container Board	Masse in g/m <sup>2</sup>
Wellenpapiere	Leichtgewichtiger WS	Light Weight	80
		Medium (LWM)	
		Medium High	
	Hochleistungs-WS	Performance 3	110
		(MHP)	
	Wellenstoff 2	Medium 2	115
	NSSC-Fluting	Semi Chemical 2	120
Liner	Testliner 3	Testliner 3	135
	Kraftliner	Brown Kraftliner	115

### Stärke

In AP 2 werden zwei unterschiedliche Verfahren eingesetzt, um Papier mit Stärke zu versetzen. Für beide Verfahren wird je eine spezielle Stärke eingesetzt. Bei der Applikation mittels Leimpresse wird eine heißwasserlösliche oxidierte Maisstärke, bei der Massezugabe ein heißwasserlöslicher Stärkeether auf Maisbasis. Die Aufbereitung der Stärkelösungen ist in Kapitel 4.2 genauer beschrieben.

In AP 3 B wird zur Verklebung der einseitigen Wellpappe eine Spezialstärke als Ready-Mix Leim verwendet.

### Wellpappe

Die Untersuchungen in AP 3 A finden an Proben aus Wellpappenwerken statt. Dazu wurden Wellpappen, die dazugehörigen Wellpappenroh-papiere und Proben des Leims zur Verklebung beschafft. Die fünf Proben (Tabelle 3-2) unterscheiden sich hinsichtlich des eingesetzten Materials (Frischfaser- und Recyclingpapiere), der Anzahl der Wellen (einwellig oder zweiwellig) sowie der Wellengeometrie (C- und/oder B-Welle). Da die B- und C-Wellengeometrie den mit Abstand größten Anteil der produzierten Wellpappe



ausmachen, wurden nach Absprache mit den Projektbegleitern vorrangig diese Wellentypen untersucht. Der Einzugsfaktor beschreibt, wie viele Meter Wellenpapier benötigt werden, um einen Meter Wellpappe zu produzieren.

Tabelle 3-2: Zusammensetzung und Aufbau der Wellpappenproben

Wellpappe	A	B	C	D	E
Liner 1	KL 135 g/m <sup>2</sup>	TL3 130 g/m <sup>2</sup>	TL3 100 g/m <sup>2</sup>	TL3 190 g/m <sup>2</sup>	TL3 115 g/m <sup>2</sup>
Welle 1	WS 140 g/m <sup>2</sup>	WS 100 g/m <sup>2</sup>	WS 80 g/m <sup>2</sup>	TL3 100 g/m <sup>2</sup>	WS 90 g/m <sup>2</sup>
Wellentyp	C	B	B	C	B
Einzugsfaktor	1,45	1,3	1,3	1,43	1,3
Liner 2 / Zw.-decke	KL 135 g/m <sup>2</sup>	WS 90 g/m <sup>2</sup>	TL3 90 g/m <sup>2</sup>	TL3 130 g/m <sup>2</sup>	TL3 115 g/m <sup>2</sup>
Welle 2	WS 100 g/m <sup>2</sup>		TL3 100 g/m <sup>2</sup>		
Wellentyp	C		B		
Einzugsfaktor	1,45		1,3		
Liner 3	TL3 130 g/m <sup>2</sup>		KL 135 g/m <sup>2</sup>		
Leim	7 g/m <sup>2</sup>	15 g/m <sup>2</sup>	6 g/m <sup>2</sup>	22 g/m <sup>2</sup>	8 g/m <sup>2</sup>
Gesamt	480 g/m <sup>2</sup>	640 g/m <sup>2</sup>	300 g/m <sup>2</sup>	750 g/m <sup>2</sup>	355 g/m <sup>2</sup>

### 3.2 Geräte und Anlagen

#### LC-Pulper und Standarddesintegrator

In Abbildung 3-2 sind die verwendeten Zerfaserungsaggregate für die Laborversuche zu sehen. Die beiden LC-Pulper haben unterschiedliche Fassungsvermögen von 19 bzw. 8 Liter. Der LC-Pulper oben links ist ein verkleinerter Nachbau des größeren Pulpers (unten links). Der kleinere Pulper wurde in Rahmen von AP 2 von Werkstattmitarbeitern des PMV gebaut. Die Leistung des Motors des verkleinerten Pulpers beträgt 1,1 kW bei 3000 U/min, die Leistung des Motors des größeren Pulpers beträgt 1,5 kW bei 3000 U/min. Wegen der Reibungsverluste an den Dichtungen ist zu erwarten, dass weniger Leistung auf die Fasersuspension übertragen wird. Die Rotoren der Pulper sind identisch aufgebaut und haben die gleiche Größe. Der Standarddesintegrator wird für die Vergleichsversuche der Zerfaserungsbedingungen in AP 2 verwendet.



Abbildung 3-2: Oben links: Nachbau des LC Pulper mit 8 l Fassungsvermögen; Unten links: LC-Pulper mit 19 l Fassungsvermögen; Rechts: Standarddesintegrator

### Laborblattbildner

Zum Herstellen der Rapid-Köthen Laborblätter wird ein Laborblattbildner der Firma Frank PTI verwendet. Der Blattbildner kann das Wasser zur Blattbildung rezirkulieren, sodass Verluste an Fein- und Füllstoffen minimiert werden können. Das Kreislaufwasser kann nach dem Recyclingzyklus in ein Fass abgelassen werden. Das Fass wird im Kühlraum aufbewahrt, sodass das Kreislaufwasser für den nächsten Recyclingzyklus wieder zur Verfügung steht.

### Vorrichtung zum Stärkekochen

Die Stärke für die Leimpresse muss vor dem Gebrauch aufgekocht werden. Dies geschieht in einem Wasserbad bei 95 °C Wassertemperatur. Die Stärkelösung befindet sich dabei in bis zu vier 800 ml Bechergläsern, welche in einem Gestell in das Wasserbad eingelassen sind. Die Stärkelösung wird während des Kochvorgangs permanent durch Teflonrührer durchmischt.



Abbildung 3-3: Vorrichtung zum Kochen der Stärke [45]

### Laborleimpresse

Die Versuche des Stärkeauftrags mittels Laborleimpresse werden mit der Laborleimpresse der Firma Einlehner durchgeführt (Abbildung 3-4). Da die Laborblätter für diese Presse zu groß sind, müssen alle Blätter in der Hälfte geteilt werden. Die Laborleimpresse hat verschiedene Einstellungsmöglichkeiten, dazu gehören die Walzengeschwindigkeit, der Anpressdruck und die Zulaufmenge des Stärkefilms. Eine gleichmäßige Temperatur der Stärke wird durch einen Wassererhitzer gewährleistet. Dieser pumpt Wasser durch den Wärmetauscher im Boden des Stärkebehälters, sodass das Stärkebad gleichmäßig temperiert wird [45].

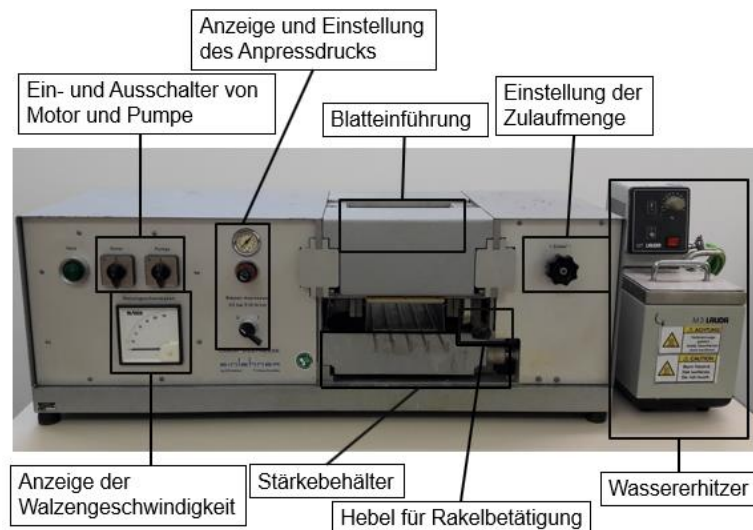


Abbildung 3-4: Einlehner Laborleimpresse

### Pilotwellpappenanlage

Mit Hilfe der Pilotwellpappenanlage kann einseitige Wellpappe unter verschiedensten Produktionsparametern hergestellt werden. Eine schematische Darstellung der Anlage

ist in Abbildung 3-5 zu sehen. Die Maschine kann mit bis zu 350 m/min bei einer Bahnbreite von 1 m betrieben werden. Die Anlage verfügt für beide Papiere über Vorheizer, die auf bis zu 180 °C geheizt werden können. Für das Wellenpapier kann zusätzlich die Umschlingung des Vorheizers eingestellt. Die Umschlingung des Liners ist nicht veränderlich. Für die Versuche im Rahmen des Arbeitspaketes 3 B war die Anlage mit einer C-Flute (7,6 mm Wellenteilung  $t$  x 3,5 mm Wellenhöhe  $h$ ) ausgerüstet. Der Anpressdruck bei der Wellenbildung kann variiert werden. Die Leimauftragsmenge kann mit einer Leimspaltregelung eingestellt werden. Üblicherweise beträgt der Leimspalt bei dieser Pilotanlage 0,2 mm. Der Anpressdruck bei der Wellenbildung kann variiert werden. Die Leimauftragsmenge kann mit einer Leimspaltregelung eingestellt werden. Üblicherweise beträgt der Leimspalt bei dieser Pilotanlage 0,2 mm.

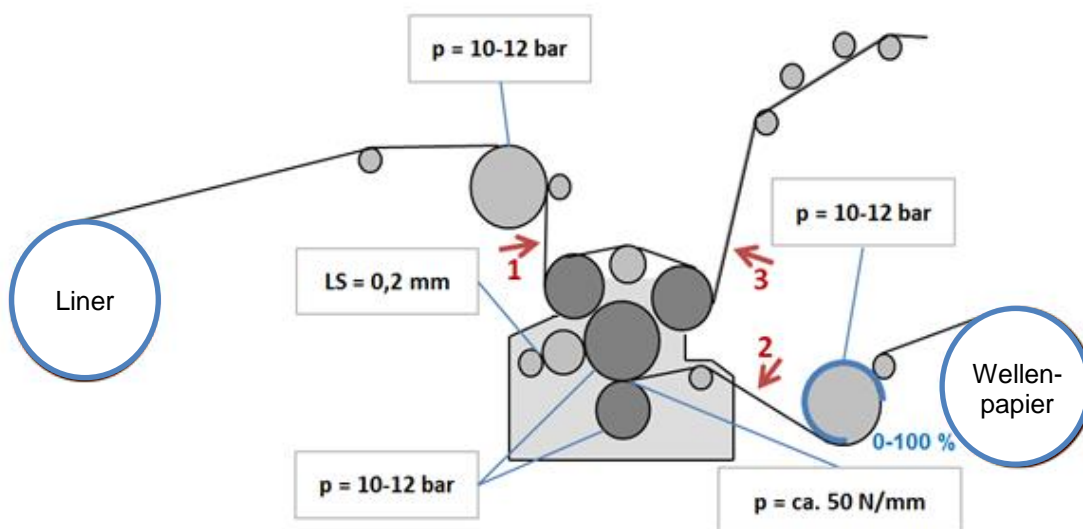


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung der Pilotanlage für die Produktion einseitiger Wellpappe

#### Stoffaufbereitungstechnik und Pilotpapiermaschine des PMV

Die verwendeten Aggregate für die Zerkleinerung und Bevorratung im Pilotversuch (AP4) sind schematisch in Abbildung 3-6 dargestellt. Der verwendete Pulper der Firma Voith hat ein Fassungsvermögen von bis zu 1500 Litern Suspension (Abbildung 3-7). Die Drehzahl des Pulper-Antriebsmotors kann über das Prozessleitsystem geregelt werden. Für die Versuche wird die Drehzahl jedoch konstant eingestellt. Da die Suspension bei einer Stoffdichte von 3 % zerkleinert wird, muss diese nach der Zerkleinerung verdünnt werden. Dies geschieht zunächst in der großen Vorratsbütte (3 m³). Aus der Vorratsbütte wird die verdünnte Suspension in vier kleinere Büten (0,25 m³) gepumpt. Die Maschinenbütte (MB) ist die letzte Bütte vor dem Stoffauflauf.

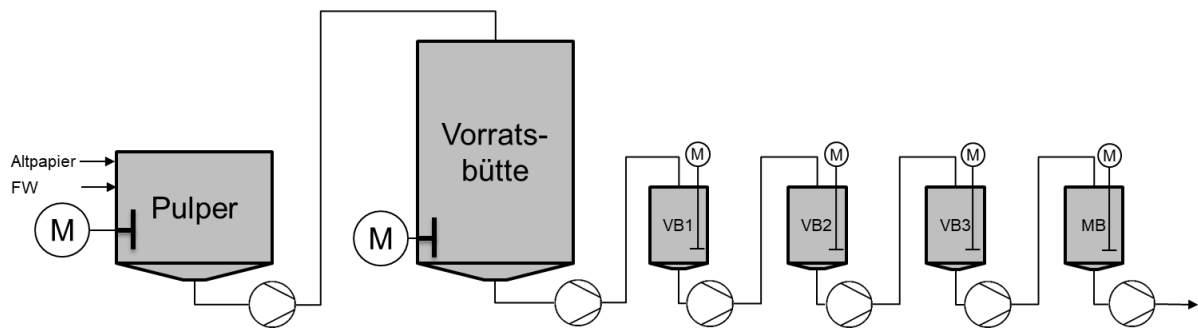


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der verwendeten Aggregate des Stoffaufbereitungs-technikums am PMV



Abbildung 3-7: Pulper der Firma Voith in der Stoffaufbereitung des PMV

Abbildung 3-8 zeigt schematisch die Verarbeitung der verdünnten Suspension aus der Maschinenbütte. Die Suspension wird zunächst aus der Maschinenbütte (MB) in einen Mischkasten gepumpt. Der Suspensionsvolumenstrom kann über ein Regelventil eingestellt werden. Der Mischkasten verfügt über einen weiteren Zulauf von der Siebpartie der Papiermaschine. Dieser Zulauf dient zur Verdünnung der Suspension auf die Stoffauflaufstoffdichte. Die Wasserrückführung in den Mischkasten beinhaltet neben dem Siebwasser auch das mittels Vakuum abgesaugte Wasser. Das abgesaugte Wasser wird über einen Flüssigkeitsabscheider vor der Vakuumpumpe zurückgewonnen (nicht abgebildet). Die Siebpartie ist in Abbildung 3-9 (links) dargestellt. Am Ende der Siebpartie befindet sich eine erste Presse. In der Pressenpartie können zwei Pressen eingesetzt werden. Für die Versuche in AP 4 wurde jedoch nur eine Presse mit Pressfilz verwendet. Nach der Pressenpartie wird das Papier in die Trockenpartie mit 8 Trockenzylindern geführt (Abbildung 3-9 Mitte). Die Trockenzylinder sind einzeln angetrieben und können individuell elektrisch beheizt werden. Alle Trockenzylinder außer Zylinder 6 sind mit Trockenfilzen ausgestattet. Nach der Trockenpartie wird das Papier auf Hülzen aufgerollt (Abbildung 3-9 rechts).



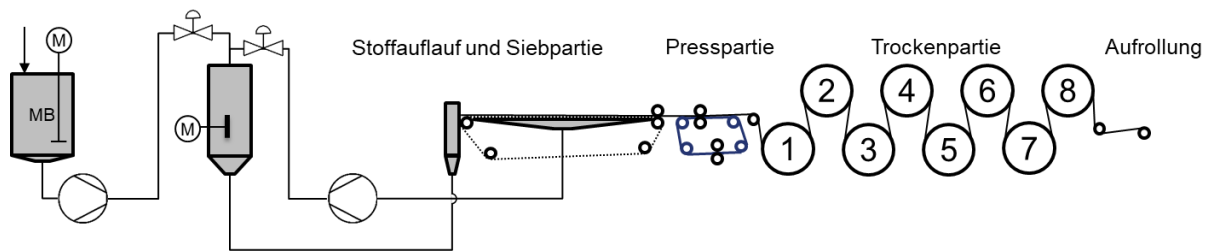


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung der Pilotpapiermaschine des PMV mit Siebwasser-rückführung als Verdünnungswasser



Abbildung 3-9: Links: Stoffauflauf mit Vakuumabsaugung und erster Press (schwarze Walze). Mitte: Trockenpartie. Rechts: Aufrollung

Die Pilotpapiermaschine des PMV kann mit einer Geschwindigkeit von bis zu 15 m/min betrieben werden. Die Bahnbreite ohne Randabschnitt beträgt ca. 30 cm.

### 3.3 Verwendete Normen

Die verwendeten Normen für die Prüfverfahren der Suspensions- und Papierprüfung sind in folgender Tabelle 3-3 zusammengestellt.

Tabelle 3-3: Übersicht der verwendeten Normen zur Suspensions- und Papierprüfung

<b>Suspensionsprüfung</b>	<b>Norm</b>
Schopper-Riegler Wert (SR)	DIN EN ISO 5267-1
Wasserrückhaltevermögen (WRV)	ISO 23714
FS5 Fiber Analyzer	ISO 16065-1
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	Merck Herstellermethode 14XXXCOD
<b>Papierprüfung</b>	<b>Norm</b>
Klimatisierung	DIN EN ISO 20187
Flächenbezogene Masse	DIN EN ISO 536
Eigenschaften bei Zugbeanspruchung	DIN EN ISO 1924-2
Streifenstauchwiderstand (SCT)	DIN 54518
Ringstauchwiderstand (RCT)	DIN 53134
Flachstauchwiderstand (CMT)	DIN EN ISO 7263
Streifenstauchwiderstand einer S-förmig eingespannten Probe (S-Test)	DIN 5014
Berstfestigkeit	DIN EN ISO 2758
Nullreißlänge (Zero-Span Tensile Strength)	ISO 15361
Glührückstand	DIN 54370

## 4 Versuchsdurchführung

In den folgenden Unterkapiteln wird die Versuchsdurchführung innerhalb der einzelnen Arbeitspakete beschrieben.

### 4.1 Arbeitspaket 1: Mehrfachrecycling Wellpappenrohapiere

Im ersten Arbeitspaket werden fünf verschiedene Wellpappenrohapiere sowie eine Mischung bestehend aus 20% KL, 40% TL3 und 40% WS untersucht. Die Rohpapiere sind in Abbildung 3-1 zu sehen und bestehen aus zwei Frischfaserpapieren (Kraftliner, NSSC-Fluting) und drei Recyclingpapieren (Testliner 2 und 3 sowie Wellenstoff). Zusätzlich konnte von den beiden Frischfasermaterialien je eine Suspensionsprobe vor der ersten Blattbildung beschafft werden. Die Frischfasersuspensionen werden entsprechend in diesen Untersuchungen das erste Mal zu Papier verarbeitet, während die Fasern der Recyclingpapiere bereits eine undefinierte Anzahl Recyclingzyklen durchlaufen haben.

Der Versuchsablauf gliedert sich in vier Abschnitte und ist in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt.

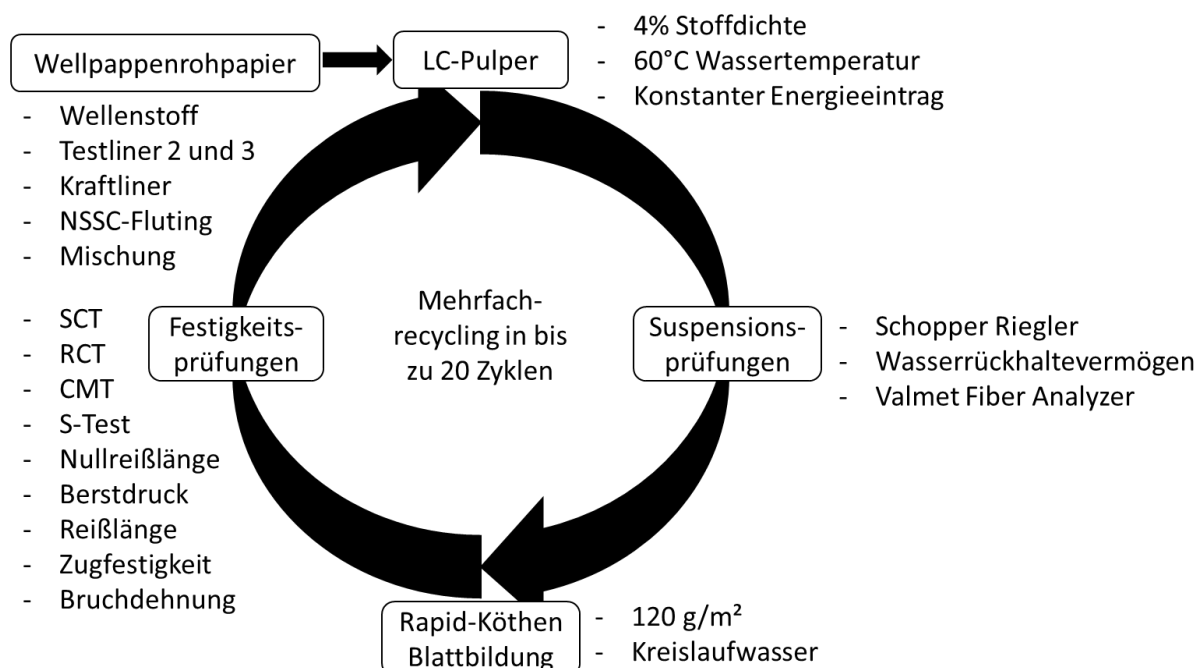


Abbildung 4-1: Schema des Versuchsablaufs in Arbeitspaket 1

#### Zerfaserung der Wellpappenrohapiere

Zunächst werden im ersten Zyklus die Wellpappenrohapiere (WPRP) zerfaserst, in den weiteren Zyklen entsprechend die Laborblätter. Die Zerfaserung der einzelnen WPRP erfolgt bereits im neu gebauten LC-Pulper aus AP2, die Zerfaserung der

WPRP-Mischung erfolgt zum Vergleich im bisherigen LC-Laborpulper mit 19 Litern Fassungsvermögen bei geringerem Energieeintrag. Zur Zerkleinerung wird jeweils Frischwasser mit 60 °C eingesetzt, die Stoffdichte beträgt jeweils 4 %. Neben den Füllstoffverlusten treten bei den Prüfungen von Suspension (SR, WRV, Fiber Analyzer) und Laborblättern (CMT) stetig Masseverluste auf, sodass die Papiermasse und entsprechend auch die Suspensionsmenge im Verlauf der Untersuchungen abnehmen. Um aber den Energieeintrag in die Suspension bei der Zerkleinerung konstant zu halten, wird die Zerkleinerungsdauer mit folgender Formel an die Fasermasse für die Zerkleinerung im Neubau des LC-Pulper angepasst. Die Referenzmasse für die WPRP-Mischung beträgt 480 g anstatt 320 g, um den Energieeintrag zu verringern.

$$\text{Zerkleinerungsdauer } t \text{ in sec} = \frac{x}{320g} * 300 \text{ sec}$$

Wobei x die Fasermasse (lutro) in g nach dem vorherigen Recyclingzyklus ist.

Der Pulper hat ein Fassungsvermögen von 8 Litern, entsprechend können bei 4 % Stoffdichte maximal 320 g Papier je Vorgang zerkleinert werden. Anhand der Zerkleinerungsdauer und der Motorleistung ergibt sich für den Pulper-Neubau somit ein Energieeintrag von 0,284 kWh/kg, während der Energieeintrag des größeren Pulpers bei 0,26 kWh/kg liegt. Die Untersuchungen der Frischfaserpapiere (KL und NSSC-Fluting) wurden initial mit je 320 g begonnen. Die Untersuchungen der Recyclingpapiere (TL 2 und 3 sowie WS) wurden wegen der erwarteten Fein- und Füllstoffverluste in drei Chargen mit insgesamt 720 g begonnen, sodass unabhängig von den Füllstoffverlusten für den zweiten Zyklus zwei volle Chargen (640 g) zur Verfügung stehen. Die Versuchsreihe der WPRP-Mischung wurde mit 720 g im größeren LC-Pulper gestartet. Da der Rotor des neuen Pulper bei 4 l Füllstand gerade noch bedeckt ist, wurden die Untersuchungen ab einem Füllstand von 5 l (200 g Papier) abgebrochen oder die Chargen zusammengeführt. Das Zusammenführen der Chargen hat jedoch den Nachteil, dass 80 g Papier nicht weiter untersucht werden können.

Nach dem Zerkleinern der Rohpapiere bzw. Laborblätter erfolgt die Suspensionsprüfung. Sofern mehrere Chargen nötig sind, findet die Prüfung nach dem Zerkleinern, Mischen und 10-minütigem Homogenisieren statt. In jedem Zyklus erfolgt die Bestimmung des Schopper-Riegler Wertes und des Wasserrückhaltevermögens.



Außerdem wird in jedem Zyklus eine Suspensionsprobe mit dem Valmet Fiber Analyzer untersucht.

### Rapid-Köthen Blattbildung

Die Blattbildung erfolgt im Rapid-Köthen Blattbildner der Firma Frank PTI. Zu Beginn des ersten Zyklus jeden Papiers wird das Kreislaufwasser zunächst mit dem Bilden von 10 Laborblättern mit Fein- und Füllstoffen angereichert. Diese Blätter werden später nicht geprüft, für die späteren Recyclingzyklen aber wieder eingesetzt. Die Blätter werden mit einer flächenbezogenen Masse von 120 g/m<sup>2</sup> (Iutro) gebildet. Die Trocknungsdauer im Rapid-Köthen Trockner beträgt 10 Minuten je Blatt bei  $93 \pm 2$  °C. Am Ende der Blattbildung eines jeden Zyklus wird das Kreislaufwasser in einen Behälter abgelassen und für den nächsten Zyklus im Kühlraum bei 4 °C aufbewahrt. Für die Recyclingpapiere wird zuvor solange eine Probe des Kreislaufwassers entnommen, um den CSB-Wert zu bestimmen, bis dieser unter 20 mg/l sinkt. Der CSB-Wert gibt Auskunft über organische Bestandteile, wie bspw. Stärke, im Kreislaufwasser. Der Blattbildner wird anschließend mit Frischwasser gespült, um Verunreinigungen und Ablagerungen für andere Nutzer zu vermeiden. Zu Beginn des nächsten Zyklus wird das Kreislaufwasser wieder in den dafür vorgesehenen Behälter eingefüllt. Bei der Blattbildung geht ein Teil des Kreislaufwassers und damit auch Fein- und Füllstoffe durch einen Überlauf verloren. Für die Mehrfachrecycling-Versuche der WPRP-Mischung wird daher der Überlauf aufgefangen und in den Kreislaufwasserbehälter zurückgeführt. Daher ist für die WPRP-Mischung eine höhere Retention der Füllstoffe zu erwarten, was sich im Glührückstand widerspiegeln sollte.

Nach der Blattbildung werden die Proben für mindestens 24 h im Normklima klimatisiert bevor die mechanischen Prüfungen durchgeführt werden. Neben flächenbezogener Masse, Blattdicke und Zugprüfung, werden wellpappenspezifische Werte wie SCT, RCT, CMT, S-Test und Berstdruck ermittelt. Um eine Aussage über die Entwicklung der Festigkeit der Fasern zu erhalten, wird die Prüfung der Nullreißlänge durchgeführt. Die verwendeten Normen für die Prüfung der Suspensionen und Laborblätter können Kapitel 3.3 entnommen werden.

In Folge der Suspensions- und Laborblattprüfung entstehen durchschnittlich Papiermasseverluste durch die Prüfverfahren von 8 bis 10 g je Zyklus. Dabei geht das Material der Suspensionsprüfung sowie der CMT-Prüfung verloren. Das Restmaterial steht für die Zerkleinerung im nächsten Zyklus zur Verfügung. Die Prüfung des

Glührückstandes erfolgt im ersten und letzten Recyclingzyklus der einzelnen Papiere, um Faserverluste zu vermeiden. Der Glührückstand der WPRP-Mischung wird in den Zyklen 1, 3, 5, 10, 15, 20 und 25 geprüft.

Auf Grund des enormen Zeitaufwandes für das Herstellen der Laborblätter, insbesondere bei den Recyclingpapieren, wird von der Zielvorgabe von mindestens 20 Recyclingzyklen der Papiere teilweise abgewichen.

## **4.2 Arbeitspaket 2: Zerfaserung und Stärkeapplikation**

Zu Beginn des Projektes wird parallel zur Probenbeschaffung der Neubau eines Niederkonsistenz (LC-) Pulper gestartet. Der Neubau orientiert sich an einem bestehenden System, das herabskaliert wird. Der neue Pulper hat ein Fassungsvermögen von bis zu 8 l Suspension, das bisherige System fasst 19 l. Der Standarddesintegrator kann hingegen lediglich 2 l Suspension bei einer Stoffdichte von 1,5 % zerfasern. Nach erfolgreichem Bau und der Inbetriebnahme steht der neue Pulper (Abbildung 3-2) bereits für die Untersuchungen in AP1 zur Verfügung.

### **4.2.1 Zerfaserung**

Die Untersuchung der Zerfaserungsbedingungen wird parallel an der Frischfasersuspension für KL aus AP 1 untersucht, da für das Frischfasermaterial größere Auswirkungen bei der Zerfaserung erwartet werden. Für die Untersuchungen in AP 1 wird bereits der Neubau des Pulpers verwendet, sodass in diesem AP vergleichend die Zerfaserung im Standarddesintegrator durchgeführt wird. Die Zerfaserung im Standarddesintegrator erfolgt nach DIN EN ISO 5263-1. Anschließend erfolgt die Suspensionsprüfung, Verarbeitung zu Laborblättern mit Kreislaufwasser und 120 g/m<sup>2</sup> sowie Prüfung der Laborblätter analog zu AP 1. Um den Einfluss der Zerfaserung besser herausstellen zu können, werden die Laborblätter ein weiteres Mal im Standarddesintegrator zerfasert und verarbeitet, sodass Messdaten für zwei Recyclingzyklen vorliegen. Die Zielgrößen der Prüfung sind die gleichen wie in AP 1. Zusätzlich können die Ergebnisse der WPRP-Mischung aus AP 1 für Vergleiche herangezogen werden. Die Zerfaserung der WPRP-Mischung erfolgt dabei im größeren LC-Laborpulper bei einem verringerten Energieeintrag von 0,26 kWh/kg. Der Energieeintrag bei den Versuchen aus AP 1 beträgt 0,284 kWh/kg und ist somit um 10 % erhöht. Da die Mischung nicht direkt vergleichbar mit den einzelnen Papieren aus AP1 ist, können an dieser Stelle nur Tendenzen abgeleitet werden.

#### 4.2.2 Stärkeapplikation

Die Stärkeapplikation wird in zwei unterschiedlichen Versuchsreihen durchgeführt. Der grundsätzliche Versuchsablauf entspricht dem Ablauf aus AP 1, wobei je Versuchsreihe der Prozessschritt der Stärkeapplikation ergänzt wird (Abbildung 4-2). Am Ende der Blattbildung wird in jedem Zyklus eine Probe des Kreislaufwassers auf den CSB-Wert geprüft.

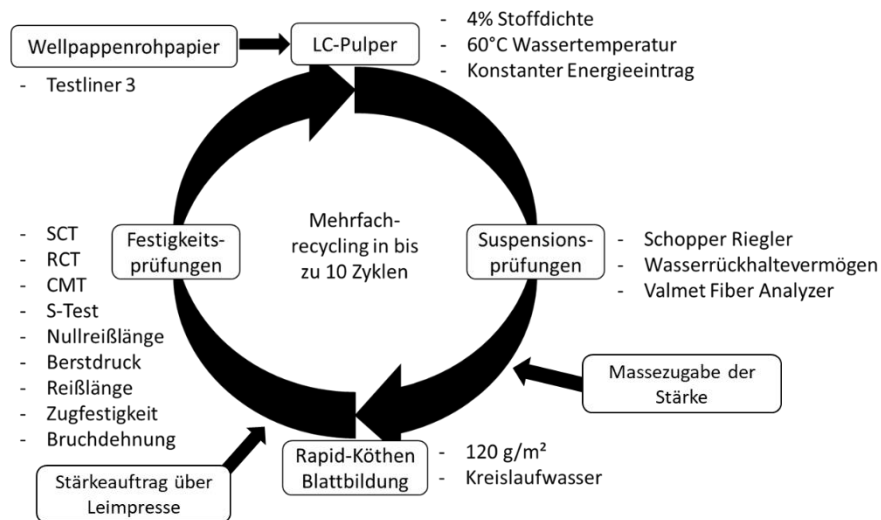


Abbildung 4-2: Schema des Versuchsablaufs der beiden Versuchsreihen (Massezugabe und Leimpresse) in AP2

#### Kochen der Stärkelösung

Vor jeder Stärkeapplikation wird die Stärkelösung neu angesetzt und gekocht. Das Kochen der Stärkelösungen erfolgt entsprechend den Herstellerangaben über 30 Minuten bei ständigem Rühren in Bechergläsern in einem Wasserbad (Abbildung 3-3). In jedem der Bechergläser befinden sich zu Beginn des Vorgangs 500 ml Stärkelösung. Während des Kochens verdunstetes Wasser wird nach dem Kochvorgang wieder aufgefüllt.

#### Leimpresse

Die Stärkeapplikation mittels Einlehner-Laborleimpresse (Abbildung 3-4) erfolgt nach dem Herstellen der Laborblätter. Die Stärkelösung wird in die Leimpresse gefüllt, umgewälzt und auf 30 °C temperiert. Für die Applikation mittels Leimpresse werden ca. 2 l Stärkelösung benötigt. Die Stärkelösung aus Collamidon weist bei 30 °C und 12,5 % Stärkeanteil eine Viskosität von 40 mPas auf. Die Viskosität wird nach DIN 2555 mit einem Brookfield Viskosimeter mit Spindel Nr. 61 bei einer Spindeldrehzahl von 100 UpM und einer Temperatur der Stärkelösung von 30 °C gemessen. Die

Laborblätter werden für die Stärkebeschichtung mittig durchtrennt, da sie für die Leimpresse zu breit sind. Anhand von Vorversuchen zu Betriebsbedingungen der Leimpresse, stellen sich 10 m/min Walzengeschwindigkeit und 3 bar Anpressdruck als geeignete Betriebsparameter heraus. Nach der Stärkeapplikation werden die Laborblätter für 3 Minuten zwischen zwei Lagen Silikonpapier im Rapid-Köthen Trockner nachgetrocknet. Um die aufgenommene Stärkemasse zu bestimmen, werden 10 Laborblätter jeweils vor und nach der Stärkeapplikation klimatisiert und ausgewogen. Die Gewichts Differenz entspricht der Zunahme der flächenbezogenen Masse in Folge der Stärkeapplikation mittels Leimpresse.

#### Massezugabe

Das Zubereiten der Stärkelösung erfolgt mit einem Gewichtsanteil von 3 % (otro) bezogen auf die Papiermasse (otro). Die Stärkelösung wird für 30 Minuten in Bechergläsern im Wasserbad gekocht. Die Massezugabe erfolgt im Verteilergefäß nach dem Zerkleinern. Die Suspension wird nach der Zugabe der Stärkelösung auf ca. 0,5 % Stoffdichte verdünnt. Nach der Massezugabe und dem Verdünnen wird die Suspension für 10 Minuten homogenisiert, bevor sie zu Laborblättern verarbeitet wird. Alle weiteren Arbeitsschritte verlaufen analog zu den Beschreibungen von AP 1. Aufgrund der geringeren Relevanz der Massezugabe von Stärke im Bereich der Verpackungspapiere, wurden für die Untersuchungen lediglich 2 Zyklen durchgeführt.

### **4.3 Arbeitspaket 3: Wellpappenherstellung**

Das dritte Arbeitspaket gliedert sich in zwei Versuchsreihen. Einerseits werden industriell hergestellte Wellpappenproben und die dazugehörigen WPRP sowie der Leim zur Verklebung der Wellpappe untersucht, andererseits wird unter definierten Bedingungen einseitige Wellpappe hergestellt. Ziel der Versuche ist es den Einfluss der Wellpappenproduktion auf das Recyclingpotential zu untersuchen.

#### **4.3.1 Industrielle Wellpappenproben**

Im Rahmen der Versuchsreihe 3 A werden 5 Proben bestehend aus Wellpappe, den dazugehörigen WPRP und dem Leim zur Verklebung der Wellpappe aus Wellpappenwerken beschafft. Die Zusammensetzung der Wellpappen (Papiere und Wellentyp) kann Tabelle 3-2 entnommen werden.

Der Leim wird direkt nach Eintreffen der Proben mit einer Rakel gleichmäßig auf einen Teil des Wellenpapiers aufgetragen und getrocknet. Die Trocknung erfolgt schonend

und nicht schrumpfungsbehindert für 10 Minuten im Umluftofen bei 50 °C. Das Papier wird vor der Leimapplikation und nach dem Trocknen des Leims im klimatisierten Zustand gewogen, um die aufgetragene Leimmenge in g/m<sup>2</sup> zu quantifizieren. Je Probenahme werden im Labor drei Proben untersucht:

1. Industriell hergestellte Wellpappe
2. Massegleiche Mischung der WPRP (unverarbeitet) ohne Leim
3. Massegleiche Mischung der WPRP (unverarbeitet) mit Leimauftrag.

Die Proben werden zunächst im LC-Pulper (AP 2) mit 6 Litern Suspension bei 4 % SD, entsprechend 240 g (otro) Probenmasse, zerfasert. Die Masseanteile der WPRP in der Mischung werden mit Hilfe der Einzugsfaktoren E und Flächengewichten FG der Papiere berechnet. Der Gewichtungsfaktor G der einzelnen WPRP wird der folgenden Formel berechnet:

$$G_{oL} = \frac{240}{FG_1 + E_2 \cdot FG_2 + FG_3 + E_4 \cdot FG_4 + FG_5}$$

Beispielhaft gilt somit für Wellpappe A (Tabelle 3-2) ein Gewichtungsfaktor  $G_{oL}$  von 0,5074, sodass sich die 240 g (otro) Probenmasse der WPRP-Mischung aus 68,5 g Liner 1 (KL), 103 g Wellenpapier (WS) und 68,5 g Liner 2 (KL) zusammensetzen. Für die Probe mit Leimauftrag können die Masseanteile anhand des Gesamtgewichtes der Wellpappe berechnet werden:

$$G_{mL} = \frac{240}{FG_{ges}}$$

Für Wellpappe A ergeben sich entsprechend  $G_{mL}$  von 0,5 und somit die Massenanteile von 67,5 g Liner 1 (KL), 101,5 g Wellenpapier (WS), 67,5 G Liner 2 (KL) und 3,5 g Leim.

Die Proben werden im LC-Pulper (AP2) in Leitungswasser mit 60 °C für 10 Minuten zerfasert. Die Suspensionen werden fraktioniert, auf den SR- und WRV-Wert sowie im Fiber Analyzer geprüft. Anschließend erfolgt die Verarbeitung zu Laborblättern mit 120 g/m<sup>2</sup> mit Kreislaufwasser. Die ersten 10 Laborblätter werden verworfen, um das Kreislaufwasser mit Fein- und Füllstoffen anzureichern. Die Blätter werden klimatisiert und wie in den vorherigen AP auf die mechanischen Kennwerte und Glührückstand geprüft. Ein mehrfaches Recycling erfolgt dabei nicht.

#### 4.3.2 Wellpappen-Pilotversuche

Die Pilotversuche geben im Gegensatz zu den industriellen Wellpappenproben die Gelegenheit, Produktionsbedingungen bei dem gleichen Ausgangsmaterial gezielt zu variieren. Im Rahmen der Pilotversuche wurden vier Wellenpapiere und zwei Liner untersucht (Tabelle 3-1). An zwei Versuchstagen werden Wellenbildungsversuche und Verklebungsversuche durchgeführt. Neben der Variation der Wellenpapiere werden bei den Wellenbildungsversuchen die Temperaturen des Papier-Vorheizers und des Corrugators, der Anpressdruck bei der Wellenbildung und die Anlagengeschwindigkeit variiert. Die Wellenbildungsversuche werden von widrigen Bedingungen (Versuchsreihe „kalt“) bei kaltem Corrugator und Vorheizer mit hohem Anpressdruck bis hin zu Standardwerten für diese Versuchsanlage (Versuchsreihe „Heiß“ 3) variiert. Die Verklebungsversuche finden bei einheitlichen Betriebsbedingungen bezüglich Temperatur, Anpressdruck und Geschwindigkeit statt. Die variierten Parameter sind bei dieser Versuchsreihe das Wellenpapier, der Liner und die Leimspaltbreite und somit die aufgetragene Leimmenge für die Verklebung. Der detaillierte Versuchsplan ist in Tabelle 4-1 zu sehen.

Von jedem Versuchspunkt wird Probenmaterial für Laboruntersuchungen entnommen. Die Wellpappenrohapiere dienen als Referenzwerte für das unverarbeitete Material. Die 38 Proben werden im LC-Pulper (AP 2) zerfasert. Wie im ersten Abschnitt dieses Arbeitspakets werden je Probe 240 g (otro) bei 4 % SD mit Leitungswasser (60 °C) für 10 Minuten zerfasert. Die Suspension wird fraktioniert, auf den SR- und WRV-Wert sowie mit dem Fiber Analyzer geprüft und mit Kreislaufwasser zu Rapid-Köthen Laborblättern mit 120 g/m<sup>2</sup> verarbeitet. Die ersten zehn Blätter werden verworfen und dienen nur dem Anreichern des Kreislaufwassers. Nach dem Klimatisieren werden die Laborblätter wie in den vorherigen AP auf Festigkeitskennwerte und den Glührückstand geprüft. Ein Mehrfachrecycling erfolgt nicht.

Tabelle 4-1: Versuchsplan der Wellenbildungs- und Verklebungsversuche

Nr.	Versuchsreihe	Temperatur Corrugator	Anpressdruck	Geschwindigkeit	Wellenpapiere	Liner	Leimspalt	
1	"Kalt"	Umgebungs- temperatur	60 bar (hoch)	100 m/min	Wellenstoff 115 g/m²			
2					Wellenstoff 110 g/m²			
3					Wellenstoff 80 g/m²			
4					Halbzellstoff 120 g/m²			
5	"Warm"	120 - 140 °C 2-4 bar Sattdampf	60 bar (hoch)	100 m/min	Wellenstoff 115 g/m²			
6					Wellenstoff 110 g/m²			
7					Wellenstoff 80 g/m²			
8					Halbzellstoff 120 g/m²			
9	"Heiß" 1	180 °C 12 bar Sattdampf (Standard)	60 bar (hoch)	100 m/min	Wellenstoff 80 g/m²			
10					Wellenstoff 110 g/m²			
11					Wellenstoff 115 g/m²			
12					Halbzellstoff 120 g/m²			
13	"Heiß" 2	180 °C 12 bar Sattdampf (Standard)	60 bar (hoch)	200 m/min (Standard)	Wellenstoff 80 g/m²			
14					Wellenstoff 110 g/m²			
15					Wellenstoff 115 g/m²			
16					Halbzellstoff 120 g/m²			
17	"Heiß" 3	180 °C 12 bar Sattdampf (Standard)	40 bar (Standard)	200 m/min (Standard)	Wellenstoff 80 g/m²			
18					Wellenstoff 110 g/m²			
19					Wellenstoff 115 g/m²			
20					Halbzellstoff 120 g/m²			
21	"Verklebung" 1	180 °C 12 bar Sattdampf (Standard)	40 bar (Standard)	200 m/min (Standard)	Wellenstoff 115 g/m²	Testliner 3, 135g/m²	Leimspalt 0,2 mm	
22					Wellenstoff 110 g/m²			
23					Wellenstoff 80 g/m²			
24					Halbzellstoff 120 g/m²			
25	"Verklebung" 2	180 °C 12 bar Sattdampf	40 bar (Standard)	200 m/min (Standard)	Wellenstoff 110 g/m²	Kraftliner, 115g/m²		
26					Wellenstoff 80 g/m²			
27	"Verklebung" 3	180 °C 12 bar Sattdampf (Standard)	40 bar (Standard)	200 m/min (Standard)	Wellenstoff 115 g/m²	Testliner 3, 135g/m²	Leimspalt 0,5 mm	
28					Wellenstoff 110 g/m²			
29					Wellenstoff 80 g/m²			
30					Halbzellstoff 120 g/m²			
31	"Verklebung" 4	180 °C 12 bar Sattdampf	40 bar (Standard)	200 m/min (Standard)	Wellenstoff 110 g/m²	Kraftliner, 115g/m²		
32					Wellenstoff 80 g/m²			
33	Wellpappen- rohpapier				Wellenstoff 115 g/m²			
34					Wellenstoff 110 g/m²			
35					Wellenstoff 80 g/m²			
36					Halbzellstoff 120 g/m²			
37						Testliner 3, 135g/m² Kraftliner, 115g/m²		
38								

#### 4.4 Arbeitspaket 4: Pilotversuch

Mit Hilfe des Pilotversuches sollen die Erkenntnisse der Laborversuche auf den Technikumsmaßstab übertragen und überprüft werden. Die Technikumsversuche werden mit 35 kg ( $m_0$ ) Wellpappenrohpapiermischung bestehend aus 20 % KL, 40 % TL3 und 40 % WS begonnen und können daher mit den Versuchen aus AP1 verglichen werden. Der Betrieb der Pilotpapiermaschine wurde in Vorversuchen auf möglichst geringe Faserverluste optimiert. Der Versuchsablauf wird im weiteren Verlauf erläutert. Insgesamt wurden 16 Recyclingzyklen durchgeführt. In den ersten 15 Zyklen wird der Verlust von Füllstoffen nicht kompensiert, um die Ergebnisse mit der WPRP-Mischung aus AP1 vergleichen zu können. Im letzten (16.) Recyclingzyklus wird der Glührückstand durch Zugabe von Calciumcarbonat bei der Zerfaserung auf das Ausgangsniveau angehoben.

Stoffaufbereitung

Das Zerfasern der Papiere erfolgt in jedem Zyklus im Technikumpulper des PMV (Abbildung 3-7) mit Frischwasser bei einer Stoffdichte (SD) von 3 %. Die Drehzahl des Pulpermotors wird im Prozessleitsystem auf 70 % limitiert, dies entspricht einer Leistung von durchschnittlich 22 kW. Um auch in den Pilotversuchen den Energieeintrag je Zerfaserung möglichst konstant zu halten wird die Zerfaserungsdauer nach der folgenden Formel an die eingesetzte Papiermasse  $m$  in kg angepasst.

$$\text{Zerfaserungszeit } t \text{ in min} = \frac{m}{35 \text{ kg}} \cdot 30 \text{ min}$$

Der Energieeintrag beträgt somit 0,314 kWh/kg und ist etwas höher als in den Laboruntersuchungen.

Nach dem Zerfasern wird die Suspension in eine 3 m<sup>3</sup> fassende Verdünnungsbütte gepumpt. Der Pulper wird ausgespritzt und mit Frischwasser gefüllt, um die verbliebenen Fasern auszuspülen und die Suspension in der Verdünnungsbütte auf 1,5 % Stoffdichte zu verdünnen. Von der Verdünnungsbütte wird die Suspension sukzessive in die vier kleinen Vorratsbütten (je 0,25 m<sup>3</sup>) gepumpt (Abbildung 3-6).

Von der Maschinenbütte (MB) wird permanent Suspension zum Zellrad gepumpt. Je nach eingestellter Drehzahl wird über das Zellrad mehr oder weniger Suspension in den Mischkasten gefördert. Die übrige Suspension läuft durch den Überlauf zurück in die MB. Dies ist schematisch in Abbildung 4-3 dargestellt. In den Mischkasten wird neben der Suspension (ca. 1,5 % SD) auch das Siebwasser gefördert. Der Volumenstrom des Siebwassers kann durch ein Drosselventil eingestellt werden. Suspension und Siebwasser werden im Mischkasten durch einen Flachrührer homogenisiert. Die Stoffdichte wird durch dieses Mischen auf ca. 0,5 % verdünnt. Vom Mischkasten strömt die Suspension durch hydrostatischen Druck auf die Papiermaschine. Somit gilt, je höher der Füllstand des Mischkastens ist, desto höher ist der Volumenstrom der verdünnten Suspension auf die Papiermaschine, da die Druckdifferenz steigt. Der Suspensionsstrom auf die Papiermaschine wird bei den Versuchen zwischen 2700 und 3000 l/h eingestellt. Die flächenbezogene Masse des Papiers wird in jedem Zyklus individuell über die Drehzahl des Zellrades und das Verdünnungswasser eingestellt.



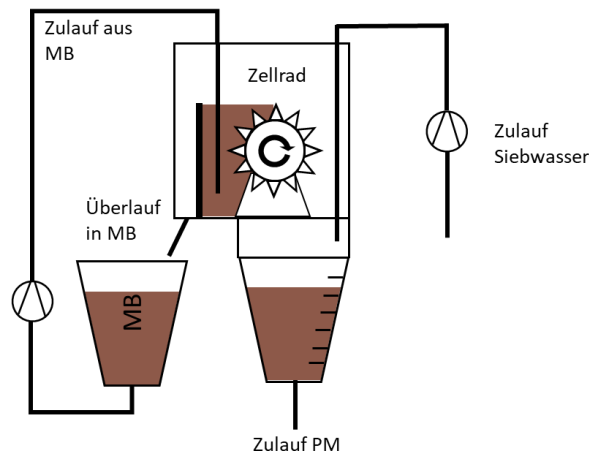


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung des Zellrades und Mischkastens der Versuchspapiermaschine am PMV

### Papierproduktion

Die elektrische Heizung der Trockenzylinder wird 20 Minuten vor Beginn der Papierproduktion eingeschaltet, sodass die Trockenzylinder auf etwa 100 bis 120 °C vorgeheizt werden. Ist dieser Temperaturbereich erreicht, kann mit der Papierproduktion begonnen werden. Zuvor werden Suspensionsproben für die Bestimmung des SR-Wertes, des WRV und für den Fiber Analyzer entnommen. Die Papiermaschine wird mit 5 m/min betrieben. Das Vakuum wird mit 40 % der Leistung betrieben, sodass sich zunächst ein deutlicher Flüssigkeitsspiegel bildet. Nach dem ersten Saugkasten ist oberflächlich noch Wasser erkennbar. Nach dem zweiten Saugkasten ist das Papier oberflächlich gut entwässert (Abbildung 3-9). Das Siebwasser und das durch Vakuum abgesaugte Wasser wird in einem Siebwassertank aufgefangen und zur Verdünnung der Suspension in den Mischkasten gefördert, um Fein- und Füllstoffverluste minimal zu halten. Das abgesaugte Wasser wird vor der Vakuumpumpe in einem Flüssigkeitsabscheider abgeschieden und in den Siebwassertank gepumpt. Dies ist schematisch in Abbildung 4-4 dargestellt. Eine weitere Maßnahme, um Papierverluste bei der Produktion zu minimieren, ist der Verzicht auf den Randbeschnitt.

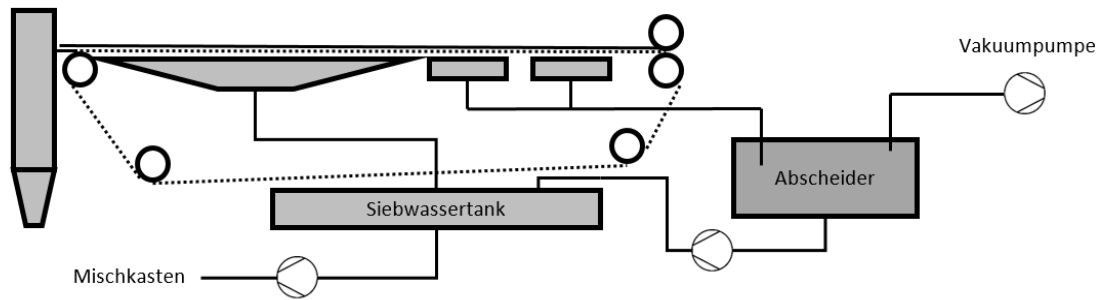


Abbildung 4-4: Schematischer Aufbau der Siebpartie mit Stoffauflauf, zwei Saugkästen, der ersten Presse sowie Flüssigkeitsabscheider mit Rückführung in den Siebwassertank

Die erste Presse ist auf einen pneumatischen Pressdruck von 4,2 bar eingestellt, die zweite Presse auf 2,6 bar. Der Pressdruck wird während der gesamten Versuche nicht verändert. Nach der Pressenpartie läuft die Papierbahn über alle 8 Trockenzylinder. In den ersten Minuten ist das Papier zunächst leicht übertrocknet. Nach etwa 10 Minuten stellt sich in der Trockenpartie ein stabiler Betriebszustand ein. Die Restfeuchte des Papiers beträgt im stabilen Betrieb ca. 3 %. Das Papier ist ab diesem Zeitpunkt nicht mehr übertrocknet und an den jedem Trockenzylinder stellt sich individuell ein konstanter Temperaturbereich ein. In der Zeitspanne bis zum stabilen Betrieb werden die Einstellungen an Zellrad und Zulauf Siebwasser angepasst, um das Zielflächengewicht von 120 g/m<sup>2</sup> zu erreichen. Das Papier wird am Ende der Trocknung auf eine Hülse aufgewickelt (Abbildung 3-9). Nach Erreichen des stabilen Betriebs werden im Abstand von 10 Minuten ca. 2 m der Papierbahn als Probe entnommen. Diese Papierproben werden nach dem Klimatisieren für die mechanische Papierprüfung in MD und CD verwendet. Die Proben im Abstand von 3 cm vom Papierrand, wegen des fehlenden Randbeschnitts, nicht geprüft. Je Zyklus werden 2 m der Papierbahn als Rückstellmuster aufbewahrt. Die Papierproben werden wie in den vorherigen AP auf Kennwerte wie Blattdicke, flächenbezogene Masse, Zugbeanspruchung, RCT, SCT, CMT, S-Test, Nullreißlänge, Berstdruck und Glührückstand geprüft. Das Material der mechanischen Prüfung, ohne die CMT-Proben, wird im nächsten Zyklus zusammen mit dem ungeprüften Papier zerfasert und der Ablauf beginnt von Neuem. Das aufgewickelte Papier wird vor dem Zerfasern gewogen und von den Hülse getrennt, sodass die Hülse nicht zerfasert werden und die benötigte Frischwassermenge für das Zerfasern bei 3 % SD bekannt ist. Das

Abbruchkriterium für diese Versuchsreihe ist das Unterschreiten des Mindestfüllstands des Pulpers von 600 Litern, entsprechend 18 kg Papier.

Aufgrund der Ergebnisse aus AP 2 und 3 wird auf die Applikation von Stärke verzichtet. Die Stärke wirkt lediglich festigkeitssteigernd, hat jedoch kaum Einfluss auf das Recyclingpotential der Fasern. Die Erkenntnisse aus AP 3 zeigen auch keinen wesentlichen Einfluss der Verarbeitung der Papiere zu Wellpappe auf das Recyclingpotential. Um den Einfluss der mechanischen Belastung auf die Faserbreite zu simulieren wird die Presse im Pilotversuch mit erhöhtem Anpressdruck betrieben.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der in Kapitel 4 beschriebenen Versuche und der Simulation vorgestellt und diskutiert.

### 5.1 Arbeitspaket 1: Mehrfachrecycling Wellpappenrohpapiere

Zunächst werden die Ergebnisse der Suspensionsprüfung und anschließend die Ergebnisse der Laborblattprüfung vorgestellt. In den folgenden Abbildungen sind die geprüften Eigenschaften (Ordinate) über der Nummer der Recyclingzyklen (Abszisse) aufgetragen. Zyklus 0 stellt dabei die Eigenschaften der erstmals verarbeiteten Suspension bzw. des erstmals produzierten Papiers dar. Entsprechend stellt Zyklus 1 die Eigenschaften nach dem ersten Recycling (Zerfaserung und erneute Blattbildung) des Papiers dar. Die beiden Frischfasermaterialien liegen bereits als unverarbeitete Suspension vor, sodass für diese beiden Materialien Ergebnisse für Zyklus 0 verfügbar sind. Alle anderen Materialien beginnen erst ab Zyklus 1, also mit dem ersten Recycling. Wenn im weiteren Verlauf des Berichtes von Frischfasermaterial gesprochen wird, sind KL und NSSC-Fluting gemeint. Mit Recyclingpapiern sind TL 2 und TL 3 sowie WS gemeint. Mit dem Kraftliner konnten 13, mit NSSC-Fluting 15, mit TL 2 20, mit TL 3 19, WS 15 und mit der WPRP-Mischung 25 Recyclingzyklen durchgeführt werden. Die Untersuchungen an Kraftliner mussten vorzeitig abgebrochen werden, da bei der Zerfaserung Aluminiumfolie in den Pulper geraten ist, welche fein zerteilt wurde und die Suspension unbrauchbar gemacht hat. Die anderen Papiere wurden rezykliert, bis nicht mehr genügend Material für die Zerfaserung zur Verfügung stand.

#### Suspensionsprüfung

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-4) sind die Ergebnisse der Suspensionsprüfungen der verschiedenen Papiere sowie der WPRP-Mischung im Verlauf des Mehrfachrecyclings dargestellt. Die Ergebnisse der WPRP-Mischung werden an dieser Stelle beschrieben, sollen wegen der veränderten Zerfaserungsbedingungen (geringerer Energieeintrag) in Kapitel 5.2.1 diskutiert werden.

Wie aus Abbildung 5-1 ersichtlich wird, steigt der SR-Wert für alle untersuchten Papiere an, die WPRP-Mischung weist jedoch eine andere Tendenz auf. Die größte Änderung im Verlauf des Mehrfachrecyclings erfolgt für das NSSC-Fluting von 27 SR (Zyklus 0) auf 54 SR (Zyklus 15). Die Recyclingpapiere TL 2 und WS weisen

insbesondere in den ersten Zyklen eine größere Veränderung im SR-Wert von Zyklus 1 nach 3 von +13 SR (TL 2) und +18 SR (WS) auf, steigen im weiteren Verlauf aber nur moderat um +3 SR (TL 2, Zyklus 20) bzw. +8 SR (WS, Zyklus 15). Die SR-Werte des KL und TL3 steigen im gesamten Verlauf nur sehr moderat von 21 SR (Zyklus 0) auf 25 SR (Zyklus 12) für KL bzw. 56 SR (Zyklus 1) auf 63 SR (Zyklus 19) für TL 3.

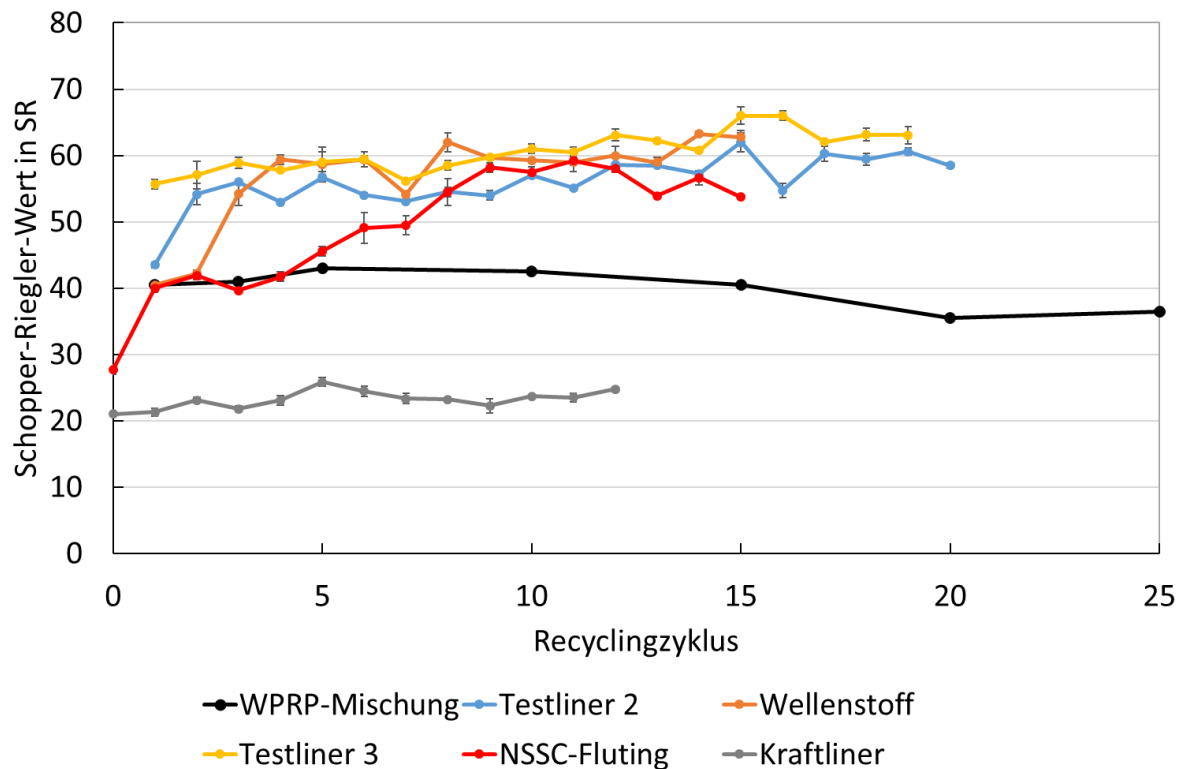


Abbildung 5-1: Entwicklung des SR-Wertes beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohpaieren

Das Wasserrückhaltevermögen (WRV, Abbildung 5-2) bleibt für die Recyclingpapiere und die WPRP-Mischung während des gesamten Mehrfachrecyclings nahezu konstant im Bereich von  $100 \pm 10\%$ . Die Frischfaserpapiere haben initial jedoch ein deutlich höheres Wasserrückhaltevermögen von 287 % (KL) und 202 % (NSSC-Fluting). Das WRV des KL sinkt bereits in Zyklus 3 auf 114 % und bleibt im weiteren Verlauf des Mehrfachrecyclings auf diesem Niveau (110 % in Zyklus 12). Das WRV des NSSC-Fluting sinkt in Zyklus 3 bereits auf 137 % und fällt auf ein Endniveau von 132 %. Das WRV der WPRP-Mischung fällt von 106 % im Ausgangszustand auf 92 % nach Zyklus 25. Die Recyclingpapiere weisen einen entgegengesetzten Trend auf, da die Werte für das WRV steigen. Die Werte steigen zwischen Anfang und Ende der Mehrfachrecyclinguntersuchungen für TL 2 von 93 % auf 101 %, für TL 3 von 91 % auf 105 % und für WS von 93 % auf 106 %. Die Zunahme des WRV für die

Recyclingpapiere ist auf den Verlust von Füllstoffen während des Mehrfachrecyclings zurückzuführen.

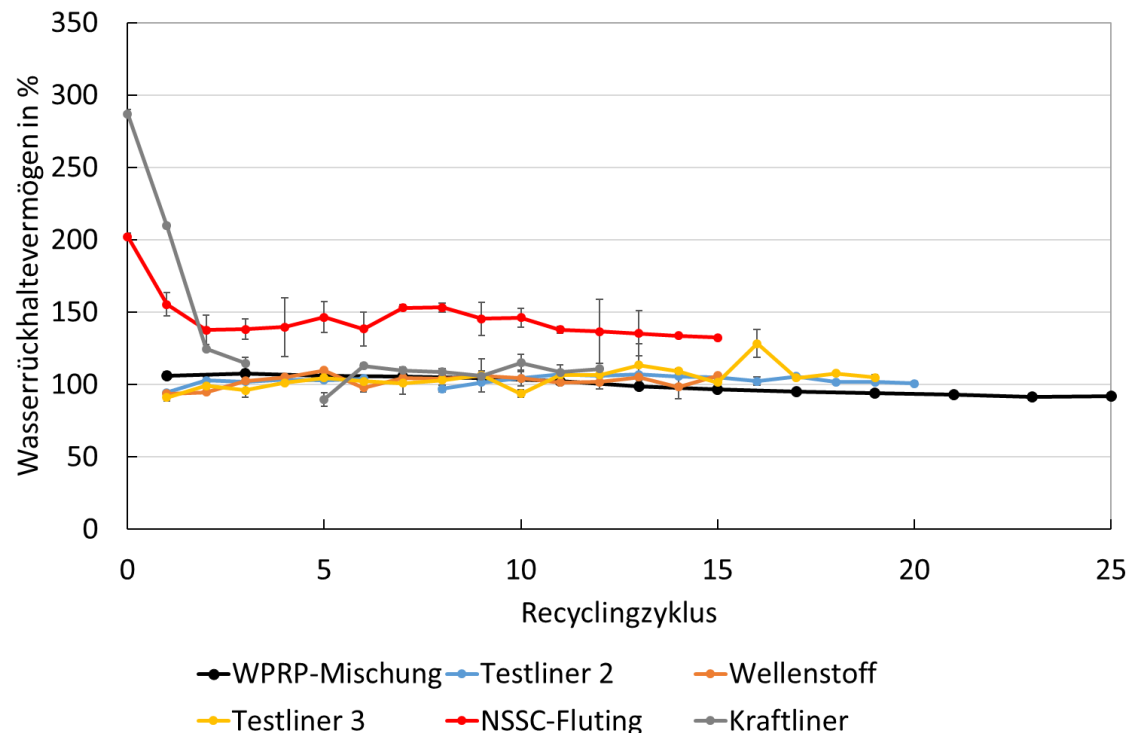


Abbildung 5-2: Entwicklung des WRV-Wertes beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohpaieren

Die Ergebnisse der fasermorphologischen Messung mit dem Fiber Analyzer sind in Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 dargestellt. Für die mittlere längengewichtete Faserlänge ist insbesondere für die Recyclingpapiere von Zyklus 1 zu Zyklus 3 eine Zunahme der Faserlänge ersichtlich. Die Zunahme der mittleren Faserlänge ist auf Feinstoffverluste insbesondere in diesen ersten Recyclingzyklen zurückzuführen. Die mittleren Faserlängen der Recyclingpapiere liegen alle im Bereich von 1,3 mm, KL besitzt mit 1,75 mm die längsten und NSSC-Fluting mit knapp 1 mm die kürzesten Fasern. Für das Frischfasermaterial ist keine Veränderung der mittleren Faserlänge erkennbar. KL und NSSC-Fluting weisen einen geringen initialen Glührückstand und entsprechend kaum Mineralien auf, sodass diese während des Mehrfachrecyclings auch nicht verloren gehen können. Entsprechend ist im Anfangsbereich dieser beiden Kurven keine Veränderung durch Füllstoffverluste erkennbar.

Die mittlere Faserbreite (Abbildung 5-4) weist für das Frischfasermaterial eine leichte Abnahme von 17,2  $\mu\text{m}$  (Zyklus 0) auf 15,1  $\mu\text{m}$  (Zyklus 15) für NSSC-Fluting und von 21,6  $\mu\text{m}$  (Zyklus 0) auf 20,1  $\mu\text{m}$  (Zyklus 13) für KL auf. Die mittlere Faserbreite der Recyclingmaterialien bleibt während des Mehrfachrecyclings nahezu konstant und

variiert um maximal 0,6  $\mu\text{m}$ . Die Abnahme der Faserbreite kann für das Frischfaser-material auf das Kollabieren des Lumens zurückgeführt werden, während das Lumen der Recyclingmaterialien bereits kollabiert ist und somit keine Veränderung der Faserbreite hervorruft.

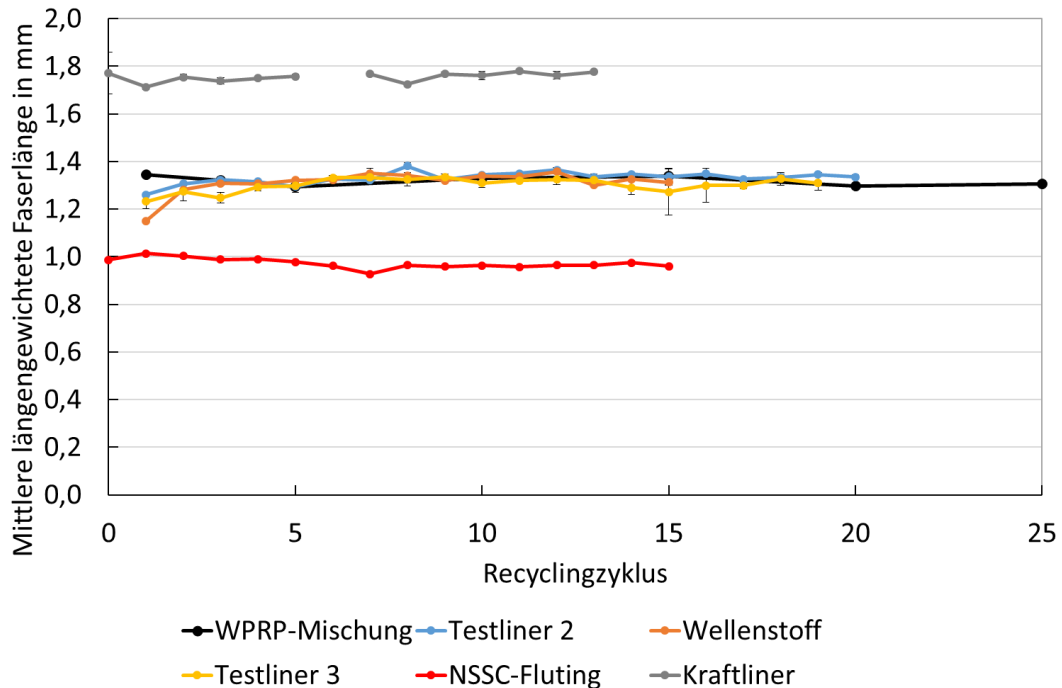


Abbildung 5-3: Entwicklung der mittleren längengewichteten Faserlänge beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohmaterialien

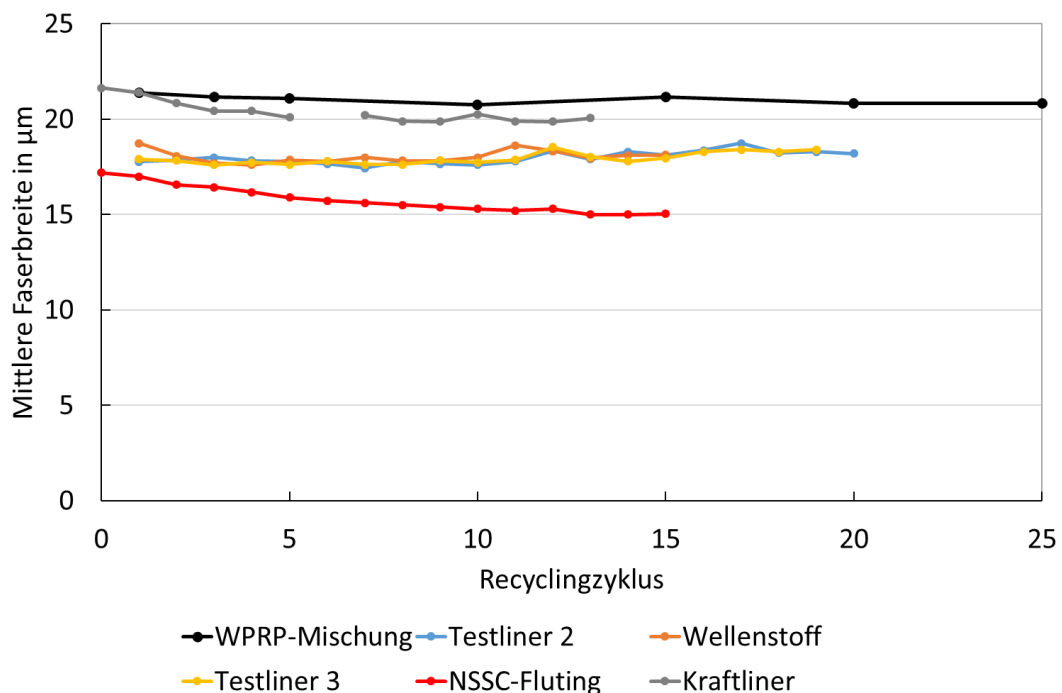


Abbildung 5-4: Entwicklung der mittleren Faserbreite beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohmaterialien

Die Messwerte des CSB-Wertes sind in Tabelle 5-1 aufgelistet. Die CSB-Werte der Frischfasermaterialien liegen in Zyklus 1 bereits unterhalb von 20 mg/l, was für die Küvettentest-Prüfmethode als Nachweisgrenze gilt. Die Werte der Recyclingpapiere sinken nach dem ersten Zyklus stark ab und sind spätestens nach dem 5. Zyklus nicht mehr messbar. Die Stärke als Hauptquelle für höhere CSB-Werte wird somit bereits früh beim Mehrfachrecycling ausgewaschen oder abgebaut.

Tabelle 5-1: CSB-Werte in mg/l im Mehrfachrecycling verschiedener Wellpappenrohapiere

Zyklus	TL2	TL3	WS	KL	NSSC-Fluting
1	172	112	400	n.b.	n.b.
2	54	53	138		
3	24	22	40		
4	21		31		
5			24		

### Laborblattprüfung

Nach der Laborblattbildung wird das Papier mechanischen Prüfungen unterzogen. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in den Abbildung 5-5 bis Abbildung 5-11 dargestellt. Im Folgenden wird auf die Darstellung der Ergebnisse der Bruchkraft verzichtet, da die Informationen redundant zu den dargestellten Ergebnissen der Reißlänge sind.

Mit den erhöhten Werten des Glührückstands können die Unterschiede der Suspensionsprüfungen zwischen den einzelnen Papieren und der WPRP-Mischung erklärt werden. Insbesondere die Abnahme des SR- und WRV-Wertes ist auf den Glührückstand zurückzuführen. Durch die erhöhte Retention von Mineralien bei der WPRP-Mischung ist ebenfalls ein Verlauf mit geringeren Festigkeitskennwerte als bei den einzelnen Papieren zu erwarten.

Tabelle 5-2 listet die Glührückstände der Proben im ersten und letzten Recyclingzyklus auf. Die initialen Werte der Recyclingpapiere sind deutlich höher als die Messwerte der Frischfaserpapiere. Um Faserverluste zu vermeiden werden zwischenzeitlich keine Messwerte des Glührückstandes erhoben. Der Glührückstand im jeweils letzten Zyklus befindet sich im Bereich von 0,1 % oder bereits darunter, was auf gebundene anorganische Stoffe in den Fasern zurückzuführen ist. Es ist davon auszugehen, dass der Glührückstand stark mit dem Masseverlust während des Mehrfachrecyclings korreliert. Der Masseverlust ist insbesondere in den ersten drei Recyclingzyklen höher als im weiteren Verlauf der Versuche. Es ist somit davon auszugehen, dass die



Mineralien insbesondere in den ersten Zyklen verloren gehen. Wie zu erwarten war, ist die Retention der Mineralien der WPRP-Mischung deutlich höher. Durch die Rückführung des Überlaufs kann sogar in Zyklus 25 noch ein deutlich erhöhter Glührückstand gemessen werden. Der initiale Glührückstand ist im Vergleich zu den einzelnen Recyclingpapieren geringer, was auf den Anteil des KL in der Mischung zurückgeführt werden kann. Mit den erhöhten Werten des Glührückstands können die Unterschiede der Suspensionsprüfungen zwischen den einzelnen Papieren und der WPRP-Mischung erklärt werden. Insbesondere die Abnahme des SR- und WRV-Wertes ist auf den Glührückstand zurückzuführen. Durch die erhöhte Retention von Mineralien bei der WPRP-Mischung ist ebenfalls ein Verlauf mit geringeren Festigkeitskennwerte als bei den einzelnen Papieren zu erwarten.

Tabelle 5-2: Messwerte des Glührückstandes der Suspension im ersten und letzten Zyklus des Mehrfachrecyclings

Glührückstand 525 °C in %	TL2	TL3	WS	KL	NSSC-Fluting	WPRP- Mischung
Zyklus 1	17,12	19,95	17,78	0,62	0,65	12,55
Letzter Zyklus	0,06	0,07	0,10	n.b.	0,07	8,07
Glührückstand 900 °C in %						
Zyklus 1	12,25	14,30	12,75	0,53	0,56	7,89
Letzter Zyklus	0,05	0,06	0,08	n.b.	0,05	5,77

Die Werte der Reißlänge (Abbildung 5-5) nehmen insbesondere in den ersten Zyklen für die Recyclingpapiere leicht zu, was auf den Verlust von Mineralien zurückzuführen ist. Die Reißlänge des NSSC-Fluting steigt zwischen Zyklus 0 und Zyklus 1 stark an. Dieser Anstieg korreliert mit dem Anstieg des SR-Wertes. Für den KL ist ein deutlicher Abfall zwischen Zyklus 0 und Zyklus 1 erkennbar. Dieser Abfall der Reißlänge wird auf das erstmalige Recycling zurückgeführt. Insgesamt lassen sich für das Recyclingpapier und das Frischfaserpapier zwei unterschiedliche Niveaus feststellen. Das Frischfasermaterial weist dabei eine Reißlänge im Bereich von 5,9 bis 6,5 km mit leicht abfallender Tendenz auf, während sich für das Recyclingmaterial ab dem 3. Zyklus eine konstante bis leicht ansteigende Entwicklung im Bereich von 3,8 bis 4,4 km zeigt. Die ansteigende Tendenz bei den Recyclingpapieren kann auf die höheren Füllstoffverluste zurückgeführt werden.

Die CMT-Prüfung (Abbildung 5-6) zeigt eine deutliche Abnahme bei den Werten des KL von 232 N (Zyklus 0) auf 162 N (Zyklus 12). Die Werte des NSSC-Fluting steigen erneut zwischen nulltem und erstem Zyklus stark und bleiben anschließend nahezu

konstant im Bereich von 205 bis 220 N. Ähnlich wie bei der Reißlänge zeigt sich für die Recyclinpapiere eine leicht ansteigende Tendenz, wobei der größte Anstieg wieder bis zum dritten Zyklus zu verzeichnen ist. Die Werte der WPRP-Mischung deuten einen leichten Abfall der CMT-Werte von 146 (Zyklus 1) zu 138 N (Zyklus 25) an.

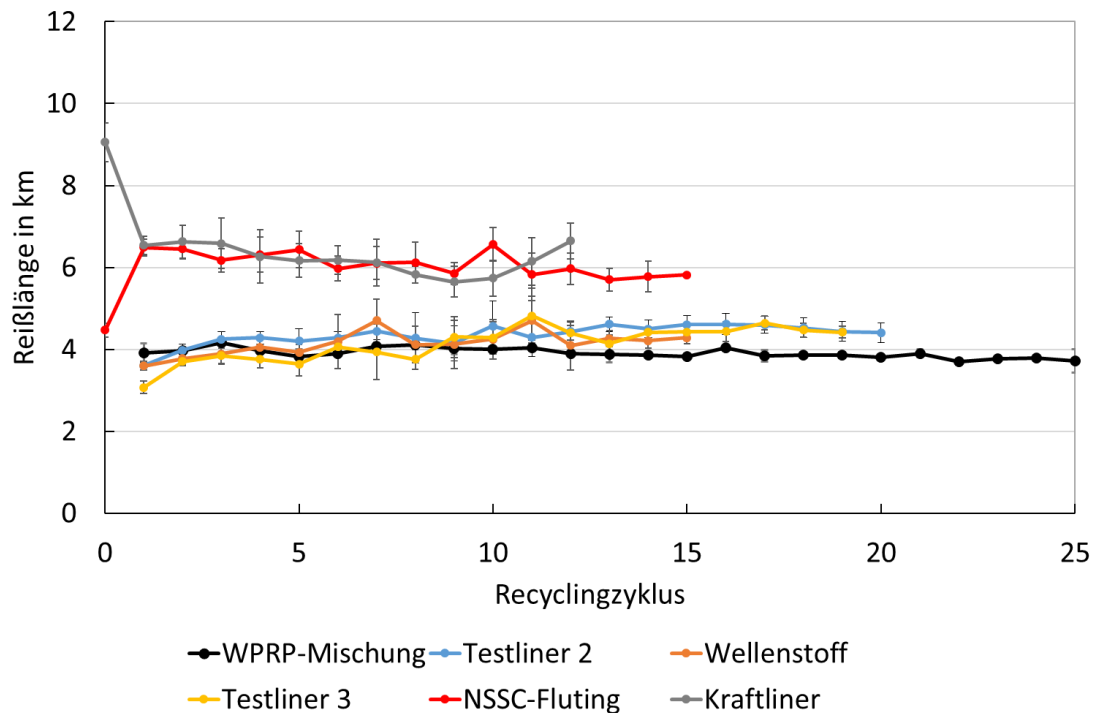


Abbildung 5-5: Entwicklung der Reißlänge beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohpapieren

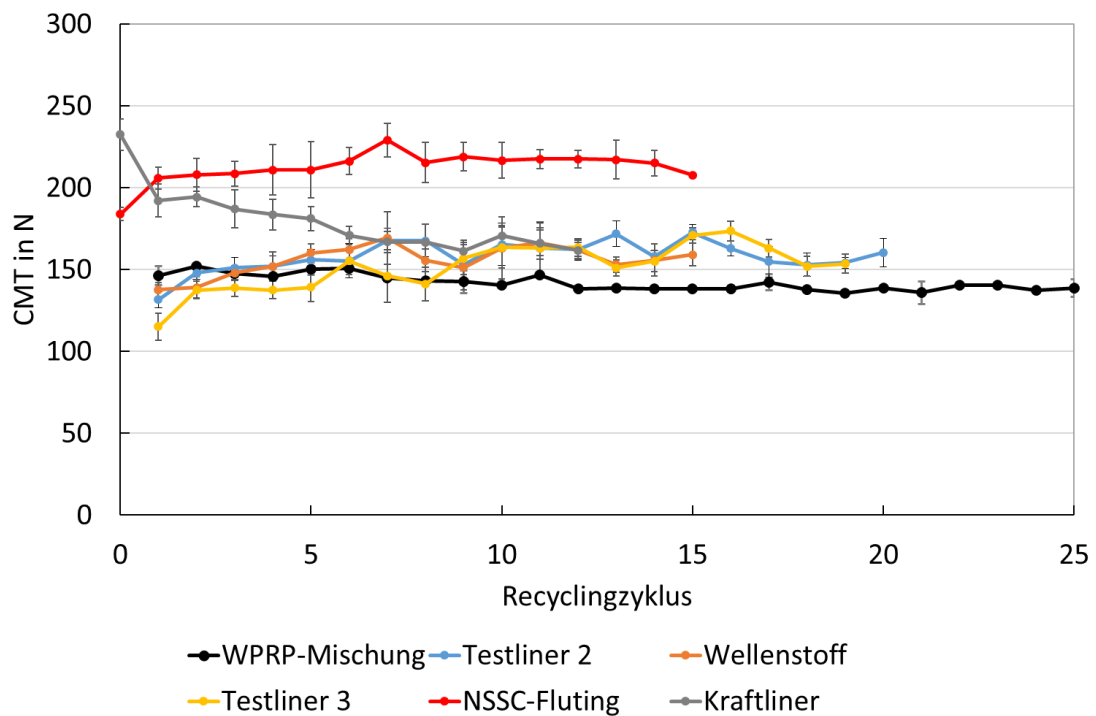


Abbildung 5-6: Entwicklung des CMT-Wertes beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohpapieren

Die zuvor beschriebenen Trends zeigen sich auch bei den nachfolgenden mechanischen Prüfungen für RCT (Abbildung 5-7), SCT (Abbildung 5-8), S-Test (Abbildung 5-9) und Berstdruck der Recyclingpapiere. Die Werte weisen insbesondere bis Zyklus 3 einen deutlichen und nachfolgend nur noch einen moderaten Anstieg auf. Ebenso zeigt sich jeweils zwischen nulltem und ersten Zyklus für das NSSC-Fluting ein starker Anstieg und für den KL ein starker Abfall der Werte. Die Werte des KL nähern sich im weiteren Verlauf des Mehrfachrecyclings für RCT und SCT an die Recyclingpapiere an, während beim S-Test ein leicht erhöhtes Niveau und beim Berstdruck ein deutlich höheres Niveau im Vergleich zu den Recyclingpapieren gehalten werden kann. Das NSSC-Fluting verhält sich umgekehrt. Für RCT und SCT kann, verglichen mit den Recyclingpapieren, ein erhöhtes Niveau im Mehrfachrecycling gehalten werden. Die Werte für S-Test und Berstdruck nähern sich hingegen den Werten der Recyclingpapiere an.

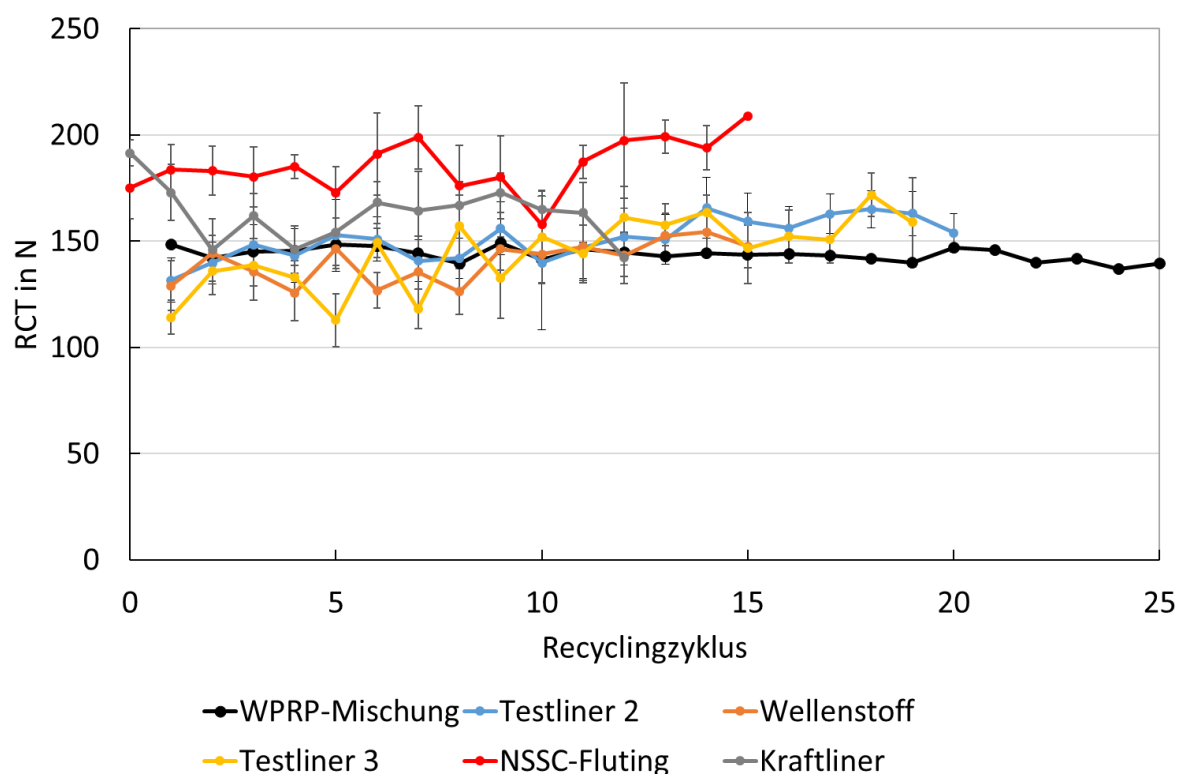


Abbildung 5-7: Entwicklung des RCT-Wertes beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohpapieren

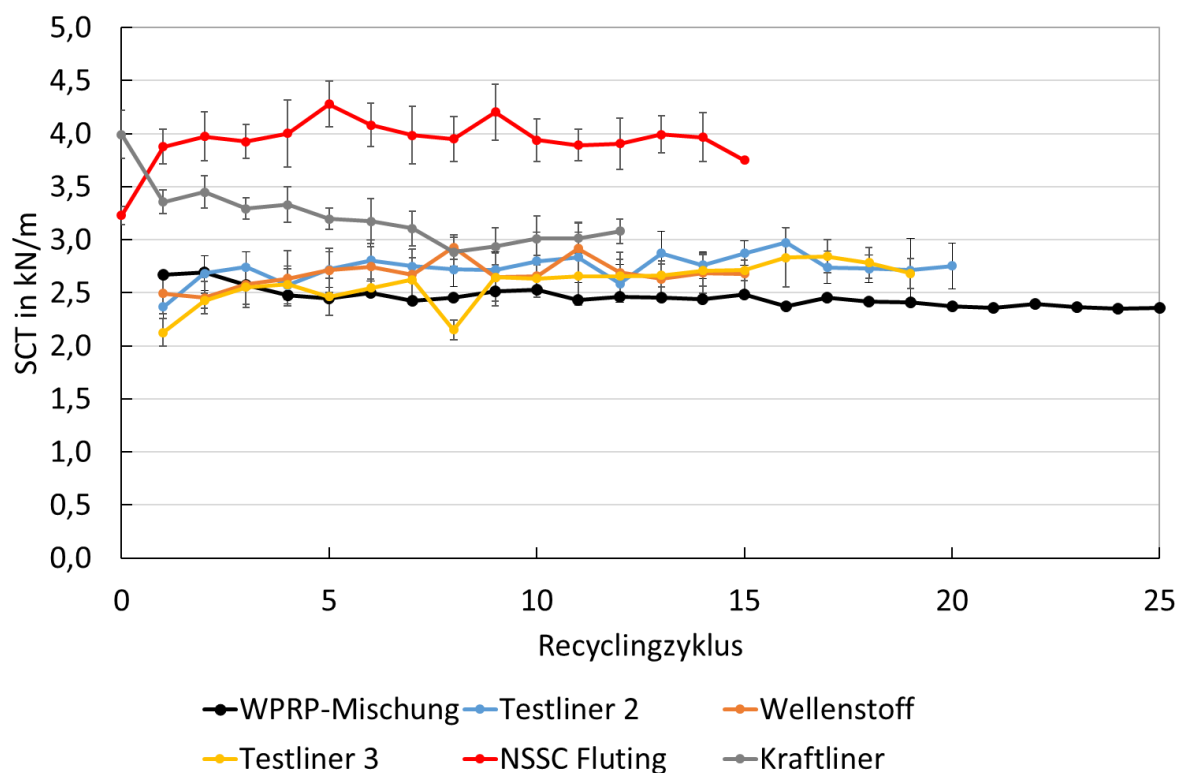


Abbildung 5-8: Entwicklung des SCT-Wertes beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohpaieren

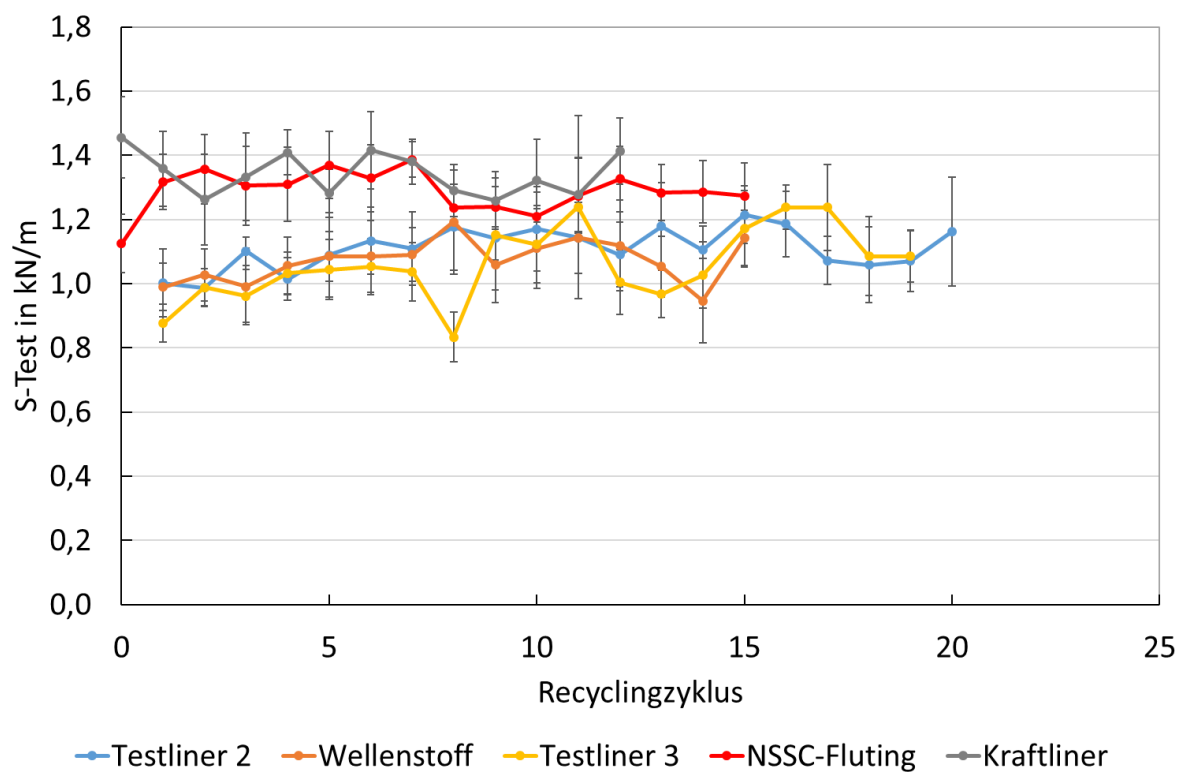


Abbildung 5-9: Entwicklung der S-Test-Werte beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohpaieren

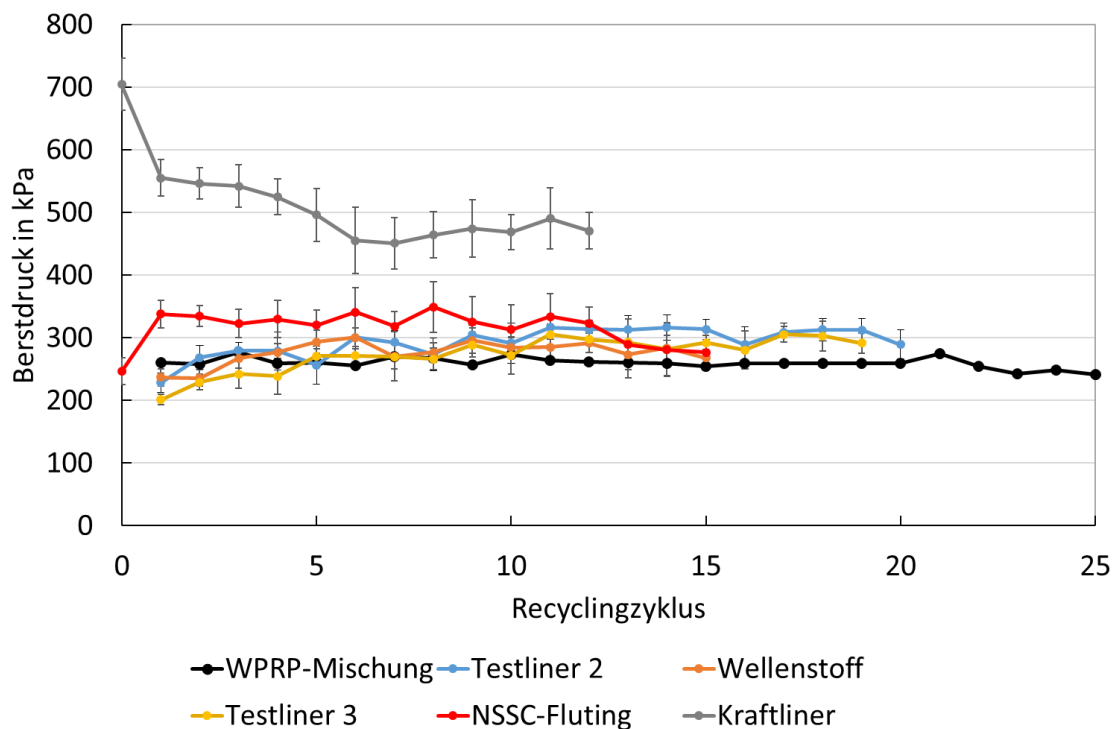


Abbildung 5-10: Entwicklung des Berstdrucks beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohmpapieren

Die Ergebnisse der Prüfung der Nullreißlänge (Abbildung 5-11) sind ein Indiz für die Einzelfaserfestigkeit. Die Werte des KL sind für die Zyklen 2 bis einschließlich 5 außerhalb des Messbereichs ( $> 60$  MPa) und wurden daher nicht eingetragen.

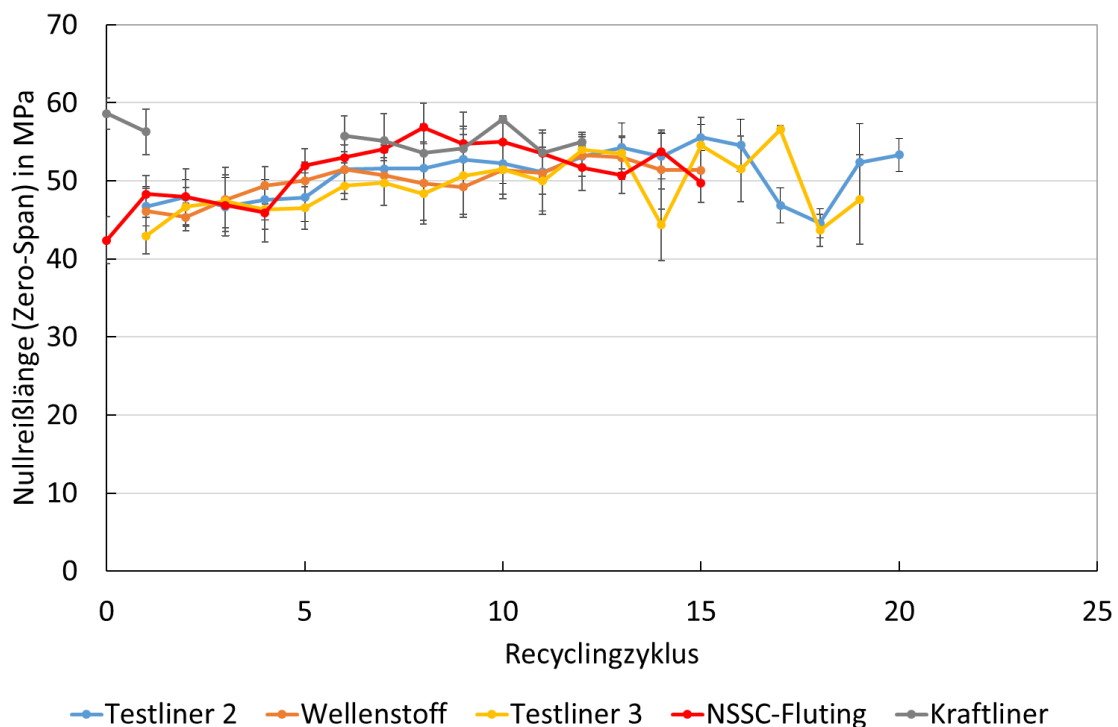


Abbildung 5-11: Entwicklung der Nullreißlänge beim Mehrfachrecycling von verschiedenen Wellpappenrohmpapieren

Zusammenfassend lässt sich anhand der Ergebnisse dieser Laboruntersuchungen sagen, dass Papierfasern häufiger als die oft postulierten 5 bis 7 Mal rezykliert werden können. Im Falle der WPRP-Mischung konnten sogar 25 Zyklen durchgeführt werden, wobei diese Fasern zuvor bereits eine undefinierte Anzahl an Recyclingzyklen durchlaufen haben. Das Material könnte durchaus auch häufiger rezykliert werden. Die fasermorphologischen Messungen mit dem Fiber Analyzer zeigen keine Kürzung der Fasern, lediglich eine geringe Reduktion der Faserbreite für Frischfasermaterial, welche auf das Kollabieren des Lumens zurückgeführt werden kann. Der Verlust von Füllstoffen bei den Recyclingpapieren, insbesondere in den ersten drei Recyclingzyklen, führt zum Anstieg der Werte bei Festigkeitsprüfungen. Die geringeren Füllstoffverluste der WPRP-Mischung erklären die geringeren Festigkeitskennwerte als bei den einzelnen Papieren. Die Mineralien blockieren die Faser-Faser-Bindungen, wodurch geringer Festigkeiten erzielt werden. Durch das Auswaschen der Füllstoffe bei den Untersuchungen der einzelnen Papiere können vermehrt Faser-Faser-Bindungen eingegangen werden, die die Papierfestigkeit steigern. Um das Festigkeitspotential der Fasern besser auszuschöpfen, könnten Füllstoffe aus dem Altpapier ausgeschleust werden. Dies hat jedoch wiederum Einfluss auf die Bedruckbarkeit der Papiere. Somit sind Festigkeits- und Bedruckbarkeitseigenschaften gegeneinander abzuwägen. In Zukunft könnte der verminderte Eintrag von grafischem Papier in den Altpapierkreislauf zu einem Rückgang der Mineralien im Wellpappenrohmaterial führen. Dennoch wird es auch in Zukunft nötig sein dem Recyclingkreislauf Frischfasern zuzuführen, um die geringen Festigkeitsverluste des Fasermaterials und Austrag von Fasermaterial durch Aufbereitungsschritte auszugleichen.

Die Laborbedingungen dieser Untersuchungen können nicht direkt mit den Bedingungen des industriellen Recyclingprozesses verglichen werden, da Reinigungsschritte in der Faserstoffaufbereitung ausgelassen wurden, um Faserverluste zu minimieren und die geforderten Recyclingzyklen zu erreichen. Zusätzlich werden Einflüsse auf das Papier z. B. durch den Gebrauch des Papiers als Verpackungsmaterial und Umwelteinflüsse nicht in diesen Untersuchungen erfasst.

## **5.2 Arbeitspaket 2: Zerfaserung und Stärkeapplikation**

Das zweite Arbeitspaket ist in zwei Versuchsreihen unterteilt. Die erste Versuchsreihe untersucht den Einfluss der Zerfaserung, die zweite Versuchsreihe den Einfluss der Stärkeapplikation im Mehrfachrecycling.

### 5.2.1 Zerfaserung

Die Ergebnisse der Zerfaserungsversuche für den KL aus AP 1 sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst. Im Standarddesintegrator wurden zwei Recyclingzyklen durchgeführt. Die Messdaten können mit den ersten beiden Zyklen der Mehrfachrecycling-Versuche des KL im kleineren LC-Pulper verglichen werden. Als Referenz sind zudem die Werte der unverarbeiteten Suspension sowie den daraus gebildeten Laborblättern, welche für das weitere Recycling genutzt wurden, in der Tabelle eingetragen.

Die Ergebnisse der Suspensionsprüfung zeigen im Verlauf der zwei Recyclingzyklen für beide Zerfaserungsaggregate erhöhte SR-Werte, wobei die Werte des Standarddesintegrators leicht höher sind als die Werte des LC-Pulpers. Gleichzeitig fallen die Werte des WRV bei der Zerfaserung im Standarddesintegrator deutlich schneller ab. Die mittlere Faserlänge bleibt nahezu unverändert und nimmt für beide Verfahren leicht ab. Die mittlere Faserbreite sinkt ebenfalls bei beiden Verfahren im gleichen Maße ab.

Die Auswirkungen auf die mechanische Papierprüfung sind deutlicher. Im Vergleich zur Zerfaserung im LC-Pulper zeigen sich für die Laborblätter der Versuchsreihe Standarddesintegrator nach zwei Recyclingzyklen für die Reißlänge, CMT, RCT und Berstdruck leicht erhöhte Messwerte. Für SCT, S-Test und Nullreißlänge jedoch leicht verringerte Werte. Für das Mehrfachrecycling zeigt sich somit, dass die Zerfaserung im Standarddesintegrator die Messwerte in geringem Maße beeinflusst.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Suspensions- und Laborblattprüfung bei unterschiedlicher Zerfaserung im Standarddesintegrator und Neubau des LC-Pulper

	Unverarbeitete Suspension	LC-Pulper		Standarddesintegrator	
Recyclingzyklus	0	1	2	1	2
Schopper-Riegler Wert in SR	21,05	21,30	23,10	22,95	26,50
WRV in %	286,99	209,66	124,47	142,84	128,08
Mittlere längengewichtete Faserlänge in mm	1,77	1,71	1,75	1,74	1,74
Mittlere Faserbreite in µm	21,63	21,40	20,83	21,23	20,60
	Erstmalige Blattbildung	LC-Pulper		Standarddesintegrator	
Recyclingzyklus	0	1	2	1	2
Reißlänge in km	9,06	7,11	6,63	7,42	7,12
CMT in N	232,44	208,81	194,42	215,62	206,51
RCT in N	191,53	187,95	146,01	174,30	168,40
SCT in kN/m	3,99	3,65	3,45	3,62	3,26
S-Test in kN/m	1,46	1,48	1,26	1,30	1,44
Berstdruck in kPa	704,20	603,43	545,90	602,40	582,30
Nullreißlänge in MPa	58,61	61,19		56,20	54,62

Die Ergebnisse der veränderten Zerfaserung bei der WPRP-Mischung wurden in AP 1 bereits dargestellt. Im Vergleich zu den Rohpapieren konnte für den SR-Wert keine Steigerung festgestellt werden. Dies kann vorrangig auf die erhöhte Füllstoffretention zurückgeführt werden, sodass der Einfluss des verminderten Energieeintrags vergleichsweise geringe Auswirkungen haben sollte. Bei den fasermorphologischen Messungen zeigt sich keine Veränderung der mittleren Faserlänge und -breite, sodass wie bei den einzelnen Papieren keine Faserkürzung detektiert werden kann. Die mechanischen Kennwerte zeigen für die WPRP-Mischung eine leicht abfallende Tendenz. Die abfallende Tendenz kann vorrangig auf den höheren Füllstoffgehalt der WPRP-Mischung im Mehrfachrecycling zurückgeführt werden. Eine eindeutige Aussage kann anhand der Ergebnisse nicht abgeleitet werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Mineralienverlust den deutlich größeren Anteil an der Entwicklung der Kennwerte hat als die Zerfaserung mit vermindertem Energieeintrag.

### 5.2.2 Stärke

Der Eintrag von Stärke wurde in zwei Versuchsreihen untersucht. Für die weitverbreitete Stärkeapplikation mittels Leimpresse wurden insgesamt 10 Recyclingzyklen durchgeführt, die industriell für Wellpappenrohapiere seltenere anzutreffende Massezugabe wurde in zwei Zyklen untersucht. Die Ergebnisse werden in den folgenden Abbildungen aufgeführt. Die Abbildungen zeigen jeweils in Braun die Ergebnisse der Leimpresen-Versuche, in Braun (gestrichelt) die Ergebnisse der Massezugabe und in Gelb die Vergleichsergebnisse des gleichen TL 3 aus AP 1 ohne Stärkeapplikation.

#### Suspensionsprüfung

Die Ergebnisse der Suspensionsprüfung sind in den folgenden vier Abbildungen dargestellt. Der Verlauf der SR-Werte (Abbildung 5-12) für die Versuchsreihe mit Leimpresse verläuft parallel zu den Werten ohne Stärkeapplikation, jedoch auf etwas geringerem Niveau. Die Werte steigen in den zehn Leimpresen-Recyclingzyklen von 42 SR (Zyklus 1) um 10 SR (Zyklus 10). Der Anstieg ist mit 6 SR von 55 auf 61 SR bei der Vergleichsprobe etwas geringer. Bei der Massezugabe tritt in den beiden Zyklen keine Veränderung des SR-Wertes auf.



Das Wasserrückhaltevermögen (Abbildung 5-13) der Versuchsreihe mit Leimpresse bewegt sich konstant im Bereich von  $102 \pm 3$  % und ist direkt vergleichbar mit den Werten der Versuche ohne Stärkeapplikation.

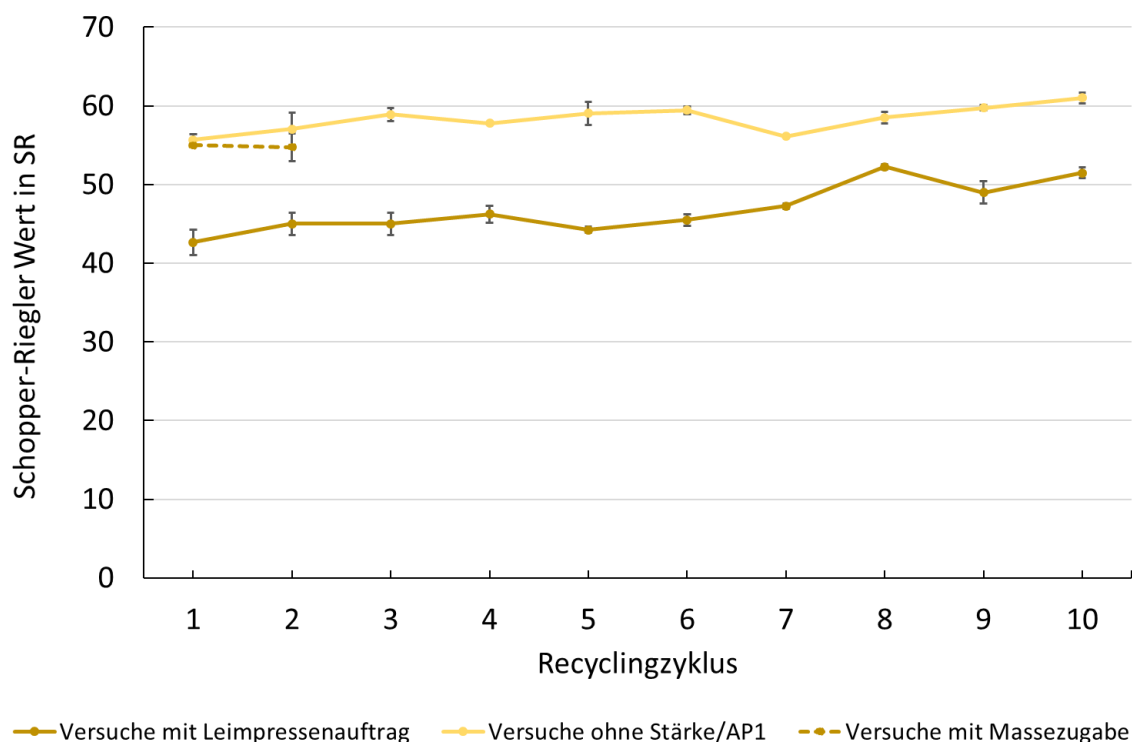


Abbildung 5-12: Veränderung des SR-Wertes im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

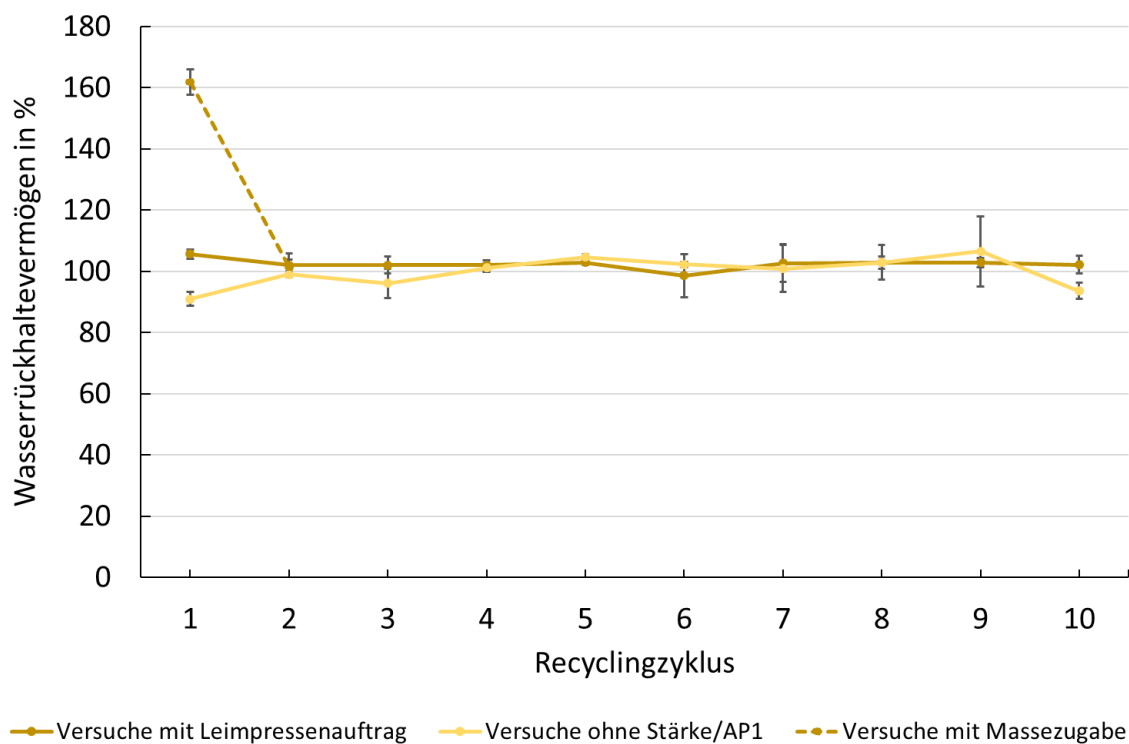


Abbildung 5-13: Veränderung des WRV-Wertes im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

Die mittlere längengewichtete Faserlänge (Abbildung 5-14) bleibt bei allen Versuchsreihen nahezu unverändert mit minimal ansteigender Tendenz, welche bereits in AP 1 auf Füllstoffverluste zurückgeführt werden konnte. Die mittlere Faserbreite (Abbildung 5-15) der Versuchsreihe mit Leimpresse ist konstant etwa 1  $\mu\text{m}$  höher als in der Versuchsreihe mit Massezugabe und ohne Stärkeapplikation. Im Verlauf des Mehrfachrecyclings kann keine signifikante Änderung der Faserbreite detektiert werden. Die minimal höhere Faserbreite könnte an der Stärkeapplikation mittels Leimpresse liegen, indem Füllstoffe durch den Anpressdruck an die Fasern gebunden werden. Der direkte Vergleich der Suspensionseigenschaften zeigt keine Verschlechterung des Recyclingpotentials für mehrfach rezykliertes Fasermaterial.

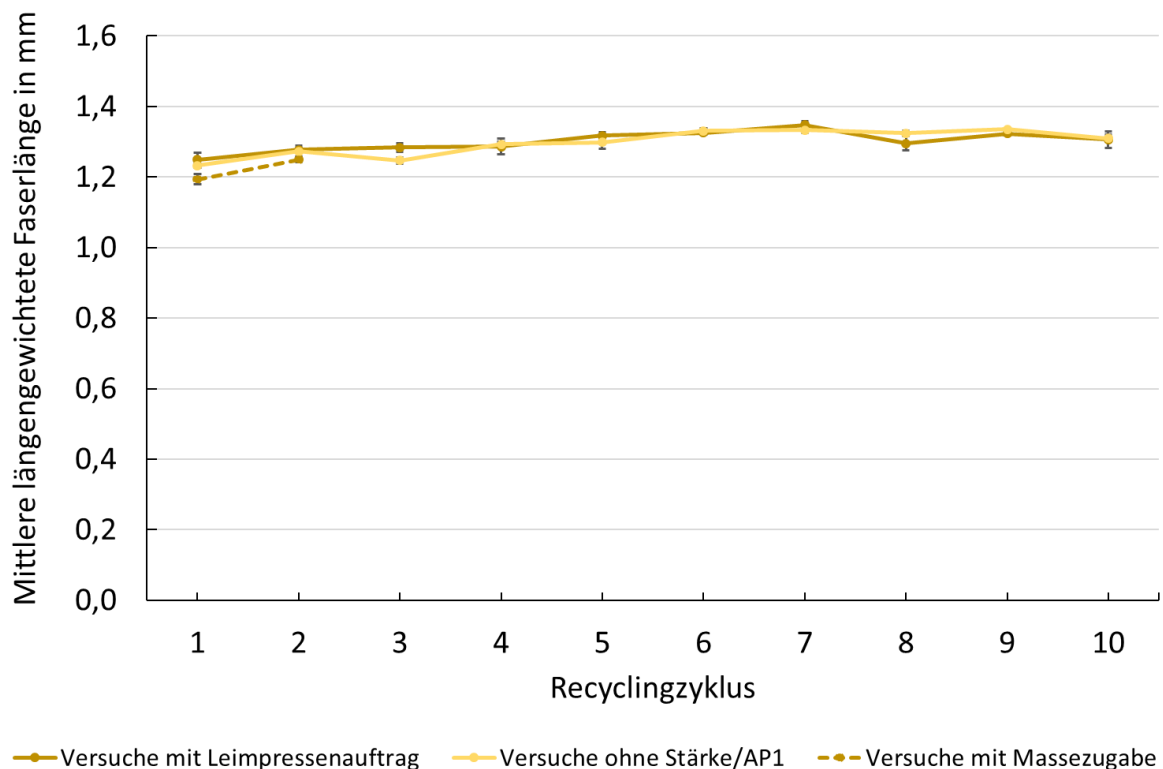


Abbildung 5-14: Veränderung der mittleren längengewichteten Faserlänge im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

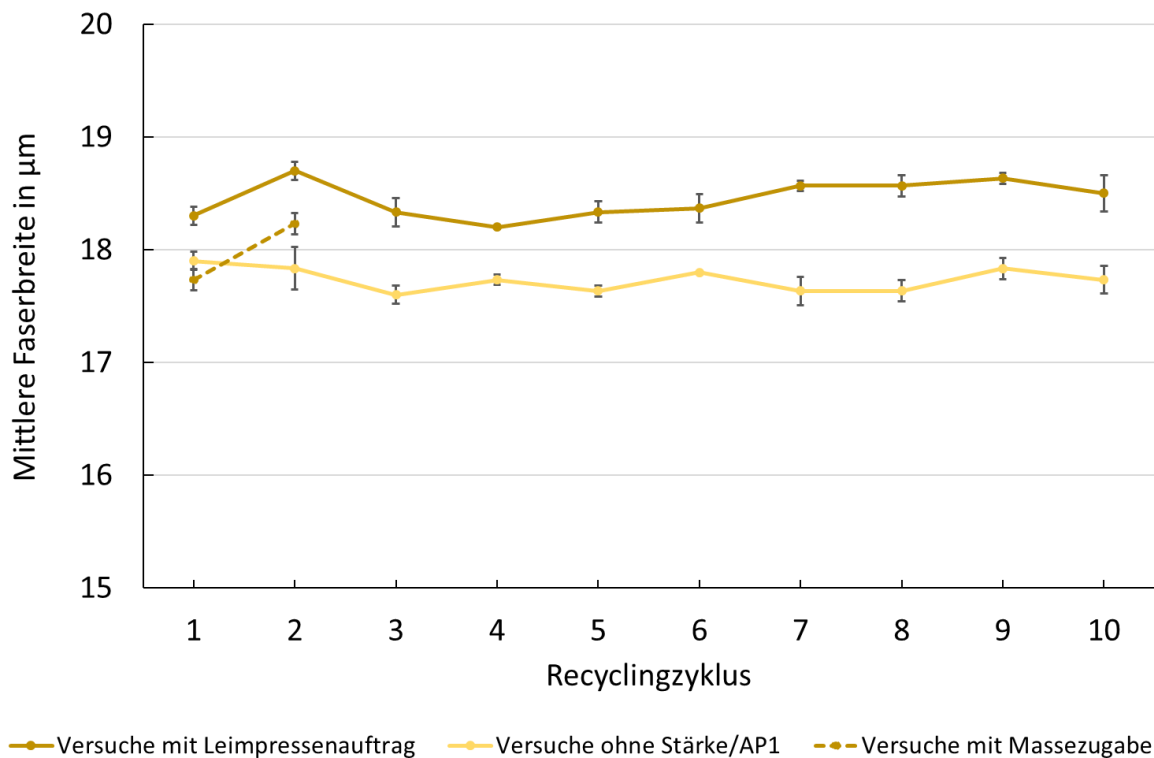


Abbildung 5-15: Veränderung der mittleren Faserbreite im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

### Laborblattprüfung

Die Ergebnisse der Laborblattprüfungen sind in den folgenden Abbildungen aufgelistet. Wie zu erwarten war, konnten die Festigkeitskennwerte durch die Applikation von Stärke sowohl für die Versuchsreihe mit Leimpresse als auch für die Massezugabe gesteigert werden.

Abbildung 5-16 zeigt die Veränderung des Glührückstandes. Für den Vergleichswert des TL3 ohne Stärkeapplikation wurde lediglich im ersten und letzten Zyklus der Glührückstand gemessen, um den Verlust von Fasermaterial zu minimieren. Der Glührückstand in Zyklus 1 beträgt dabei 14,3 % und in Zyklus 19 lediglich 0,06 %. Es ist davon auszugehen, dass der Glührückstand in den ersten Zyklen deutlich gefallen ist und ab Zyklus 5 nur noch moderat sinkt. Die hohen Verluste der Papiermasse in den ersten Zyklen zeigt sich auch bei der Versuchsreihe mit Leimpresse. Die Verluste korrelieren mit dem Rückgang des Glührückstandes. Der mittlere prozentuale Masseverlust ist mit 5,5 % für die Versuche ohne Stärkeapplikation höher als für die Versuchsreihe Leimpresse (4,9 %). Die aufgetragene Stärke verändert den Glührückstand nur minimal durch anorganische Bestandteile der Stärke. Daher ist davon auszugehen, dass die Kurve des Glührückstands für die Versuchsreihe ohne

Stärkeapplikation mit einem größeren Gefälle unterhalb der Kurve der Leimpresenversuche angeordnet ist.

Abbildung 5-17 zeigt die Veränderung des CSB-Wertes im Mehrfachrecycling mit und ohne zusätzlicher Stärkeapplikation. Wie zu erwarten war, steigt der CSB-Wert durch die Applikation von Stärke im Vergleich zur Probe ohne Stärkeapplikation an. Dennoch ist im Verlauf des Mehrfachrecyclings eine Abnahme des CSB-Wertes zu detektieren. Die CSB-Werte der Zyklen 4 bis 8 sind nicht eingetragen, da beim Einfrieren der Proben Stärke aus der Lösung ausgefallen ist und nach dem Auftauen und Messen der Proben nicht wieder in Lösung gebracht wurde. Entsprechend besteht eine konstante Differenz zu den Werten der nicht eingefrorenen Proben.

Abbildung 5-18 zeigt die prozentuale Stärkeaufnahme der Laborblätter bei der Stärkeapplikation mittels Leimpresse. Die Stärkeaufnahme wurde durch die Gewichtsdiﬀerenz der jeweils klimatisierten Laborblätter vor und nach der Stärkeapplikation ermittelt. Trotz relativ konstanter Stärkeaufnahme in jedem Recyclingzyklus steigt der CSB-Wert nicht an.

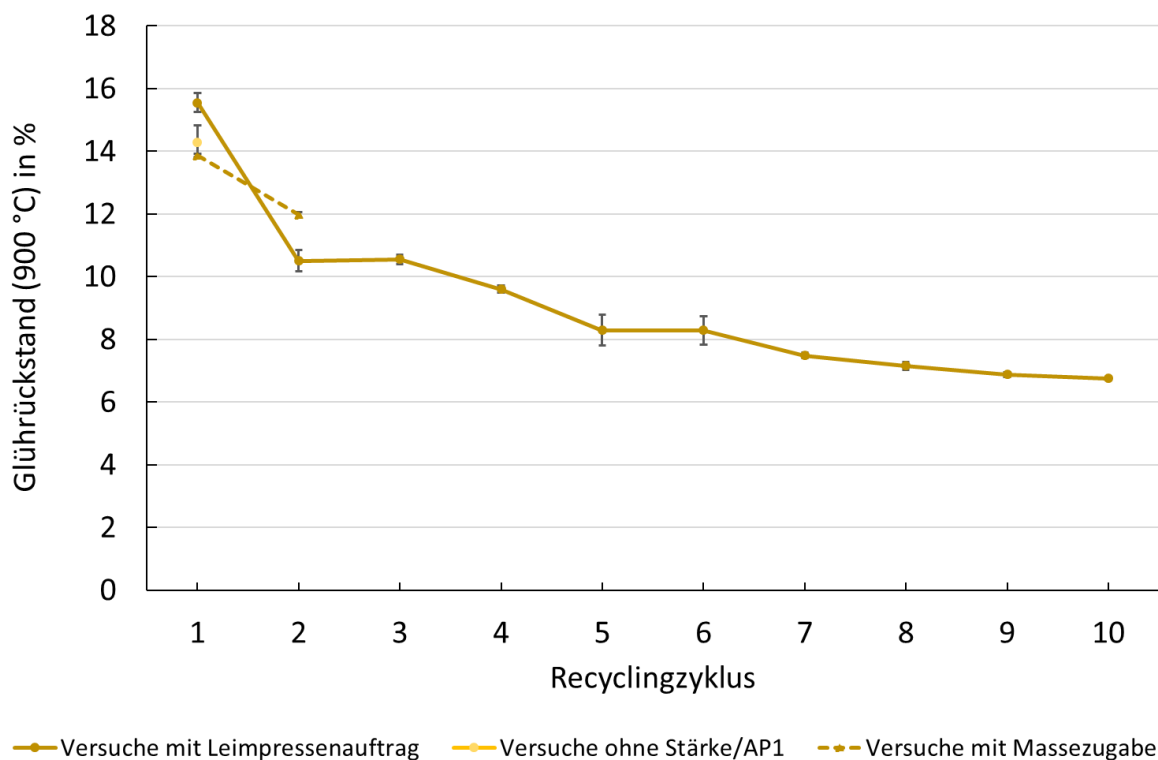


Abbildung 5-16: Veränderung des Glührückstandes (900 °C) im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

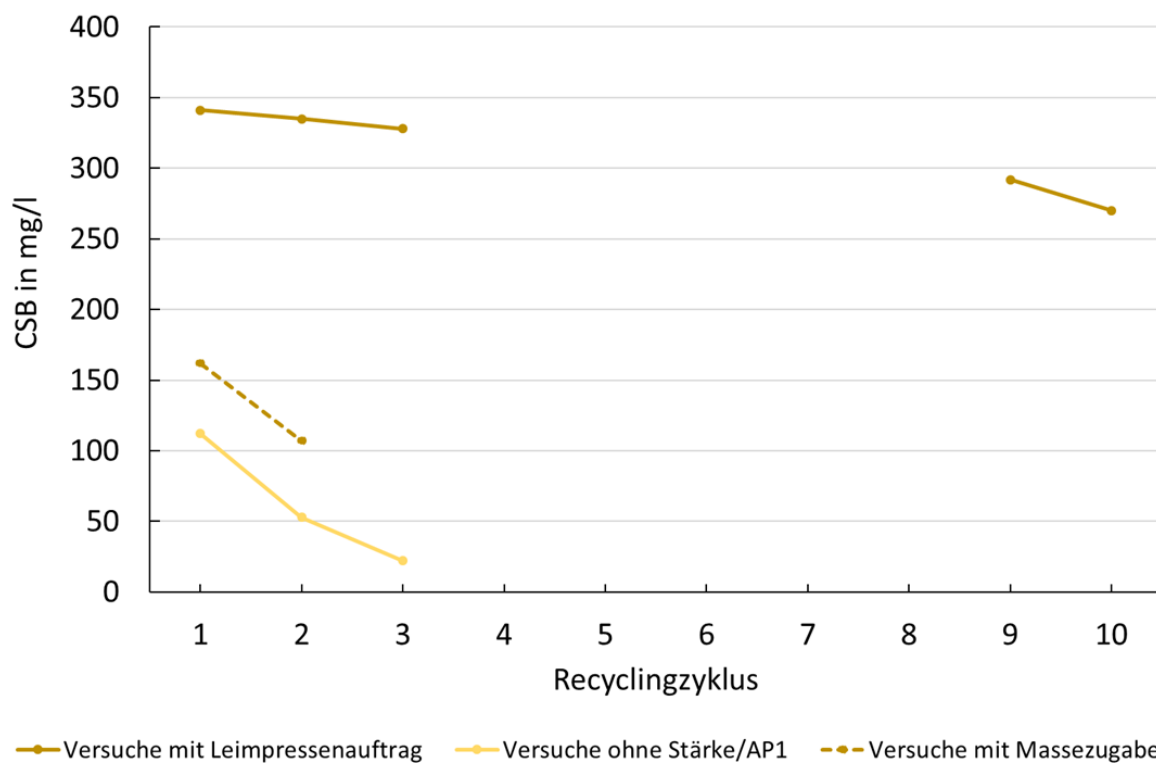


Abbildung 5-17: Veränderung des CSB-Wertes im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

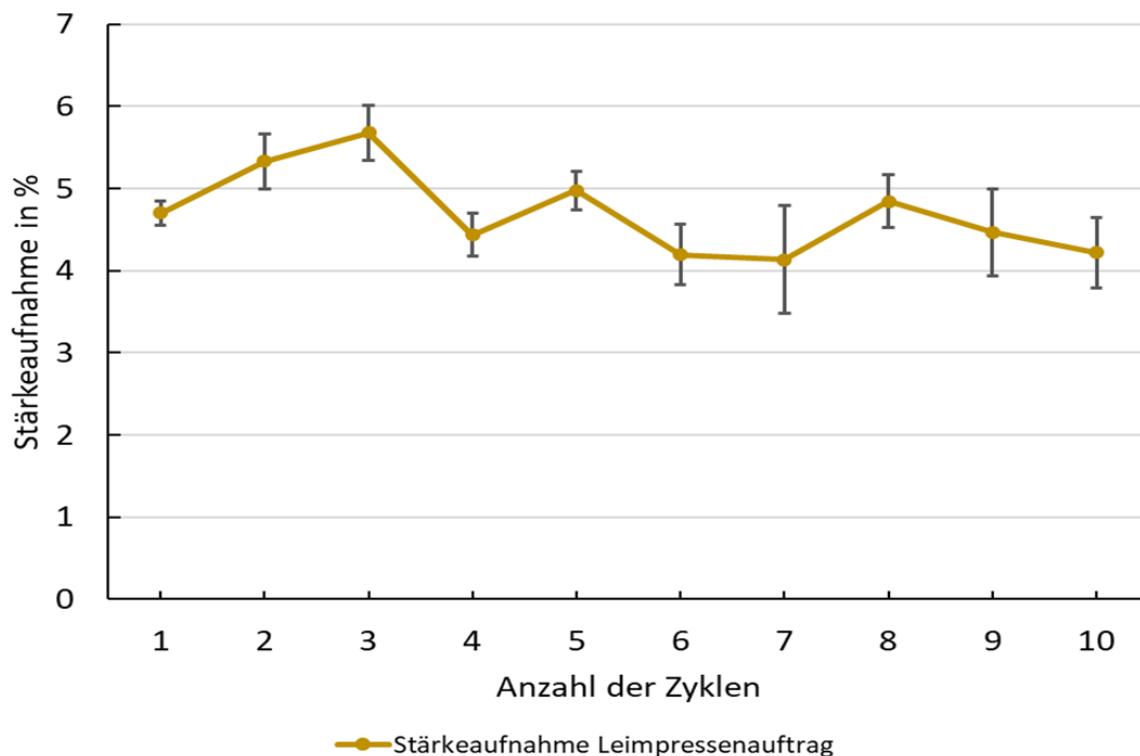


Abbildung 5-18: Stärkeaufnahme der Laborblätter bei der Stärkeapplikation mittels Leimpresse

Die Reißlänge (Abbildung 5-19) konnte durch die Stärkeapplikation von anfangs 3.0 km (Zyklus 1 ohne Stärke) auf 5,0 km (Leimpresse) bzw. 5,7 km (Massezugabe)

gesteigert werden. Im Verlauf des Mehrfachrecyclings steigen die Werte ohne Stärkezugabe etwas stärker an (4,3 km in Zyklus 10) als die Werte der Leimpresen-Versuche (5,8 km in Zyklus 10).

Die Ergebnisse der CMT-Prüfung sind in Abbildung 5-20 dargestellt. Während sich die Werte der Leimpresen-Versuche konstant im Bereich von  $193 \pm 5$  N befinden, steigen die Werte der Versuche ohne Stärkeapplikation von 115 N (Zyklus 1) auf 163 N (Zyklus 10) an. Der größte Anstieg bei den Versuchen ohne Stärkeapplikation findet dabei von Zyklus 1 zu 2 statt. Dieser kann auf hohe Mineralienverluste zurückgeführt werden.

Die Ergebnisse für RCT (Abbildung 5-21), SCT (Abbildung 5-22), S-Test (Abbildung 5-23) und Berstdruck (Abbildung 5-24) zeigen für die Versuche mit Stärkeapplikation einen leichten Anstieg der Werte im Verlauf des Mehrfachrecyclings. Die Vergleichswerte ohne Stärkeapplikation weisen insbesondere von Zyklus 1 zu 2 einen stärkeren Anstieg auf. Im weiteren Verlauf ist der Anstieg nur noch moderat und mit dem Anstieg der Werte mit Stärkeapplikation vergleichbar.

Die Ergebnisse der Nullreißlänge (Abbildung 5-25) zeigen ebenfalls einen positiven Einfluss der Stärkeapplikation. Auch bei diesen Kennwerten fällt der Anstieg bei den Versuchen ohne Stärkeapplikation etwas stärker aus.

Die Applikation von Stärke hebt, wie zu erwarten war, das Niveau aller Festigkeitsmessungen im Vergleich zu den Versuchen ohne Stärkezugabe an. Gleichzeitig verbessert die Stärke die Retention von Füllstoffen. Füllstoffe gehen im Verlauf des Mehrfachrecyclings entsprechend langsamer verloren. Dies hat im Mehrfachrecycling zur Folge, dass die Festigkeitskennwerte der Versuchsreihen mit Stärkeapplikation zwar auf einem höheren Niveau sind, aber weniger stark durch den verringerten Füllstoffverlust ansteigen als die Versuche ohne Stärkezugabe.

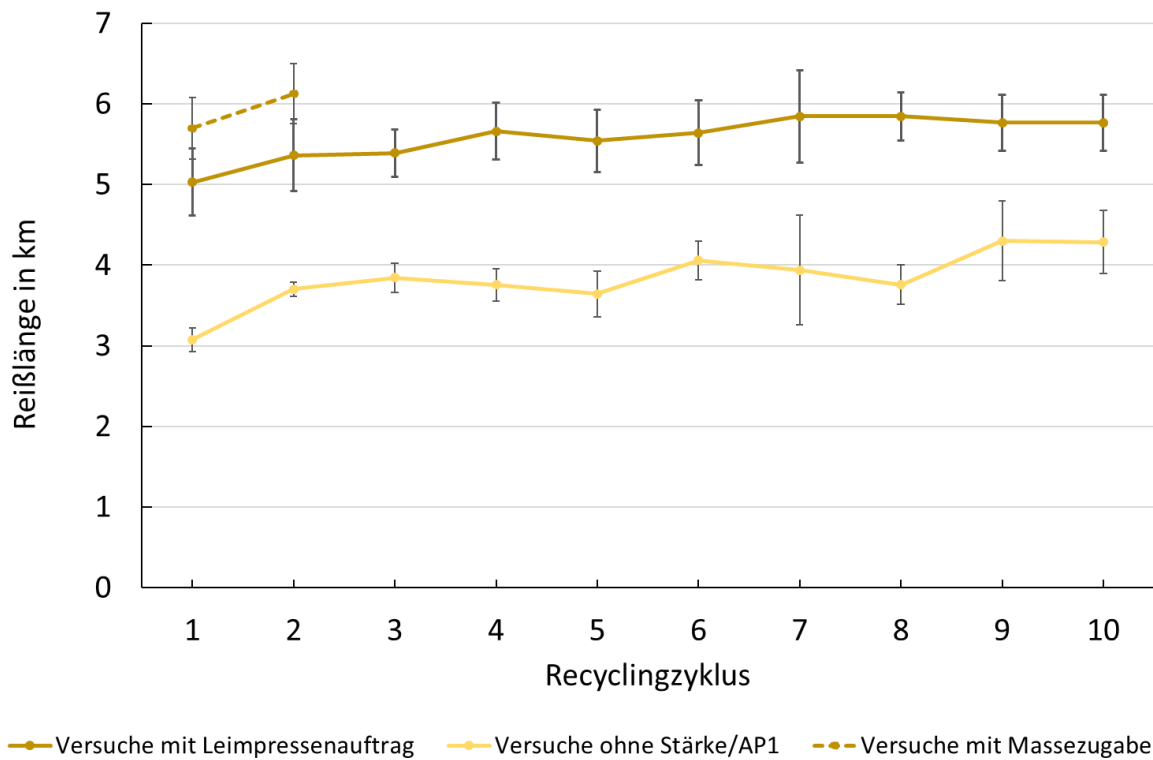


Abbildung 5-19: Veränderung der Reißlänge im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

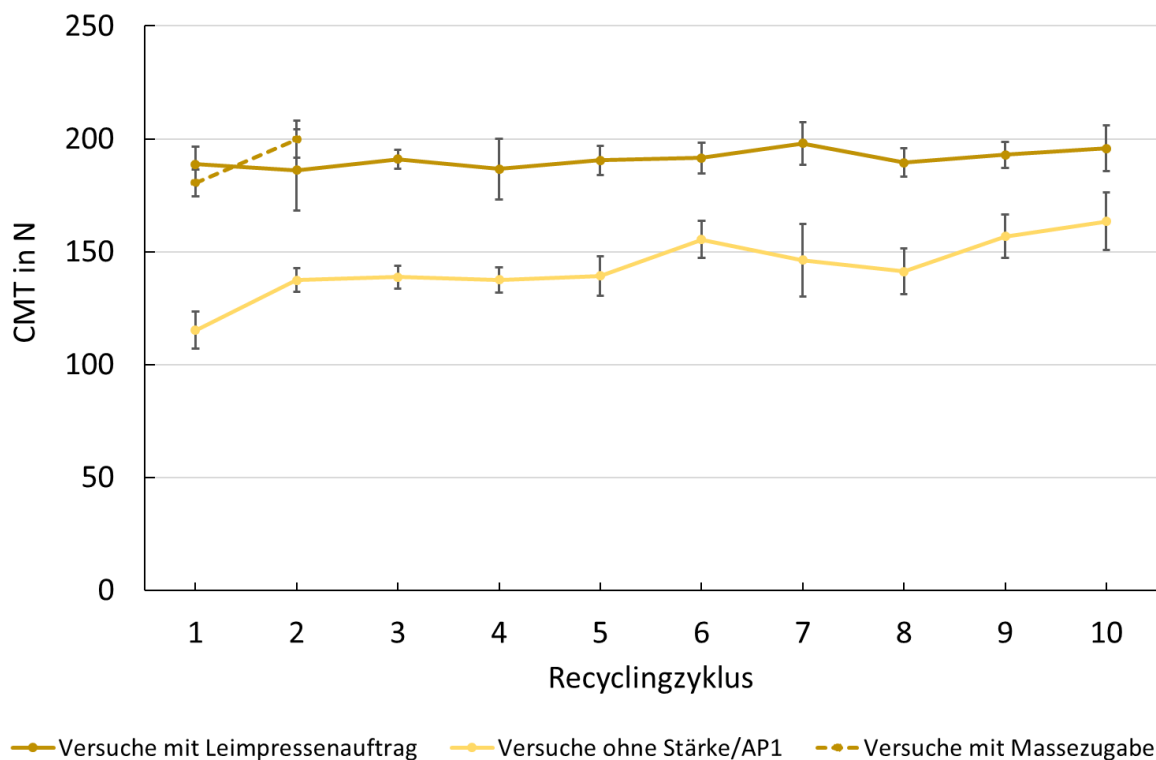


Abbildung 5-20: Veränderung des CMT-Wertes im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

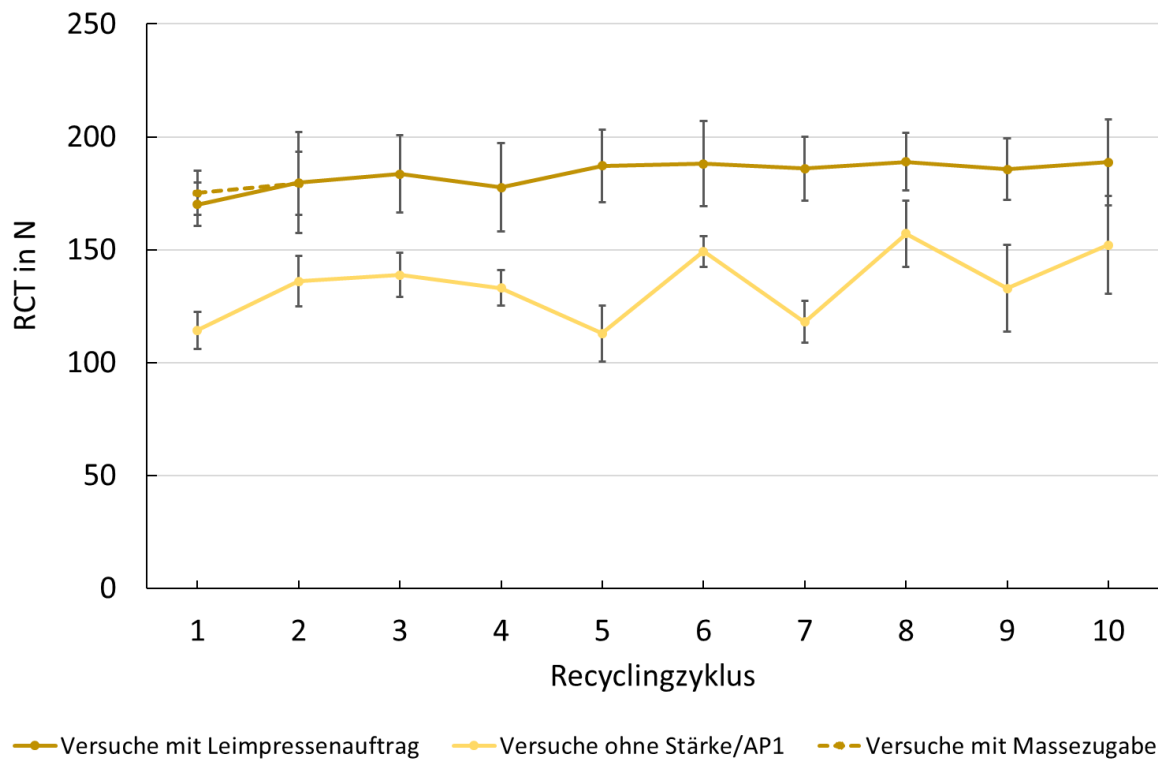


Abbildung 5-21: Veränderung des RCT-Wertes im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

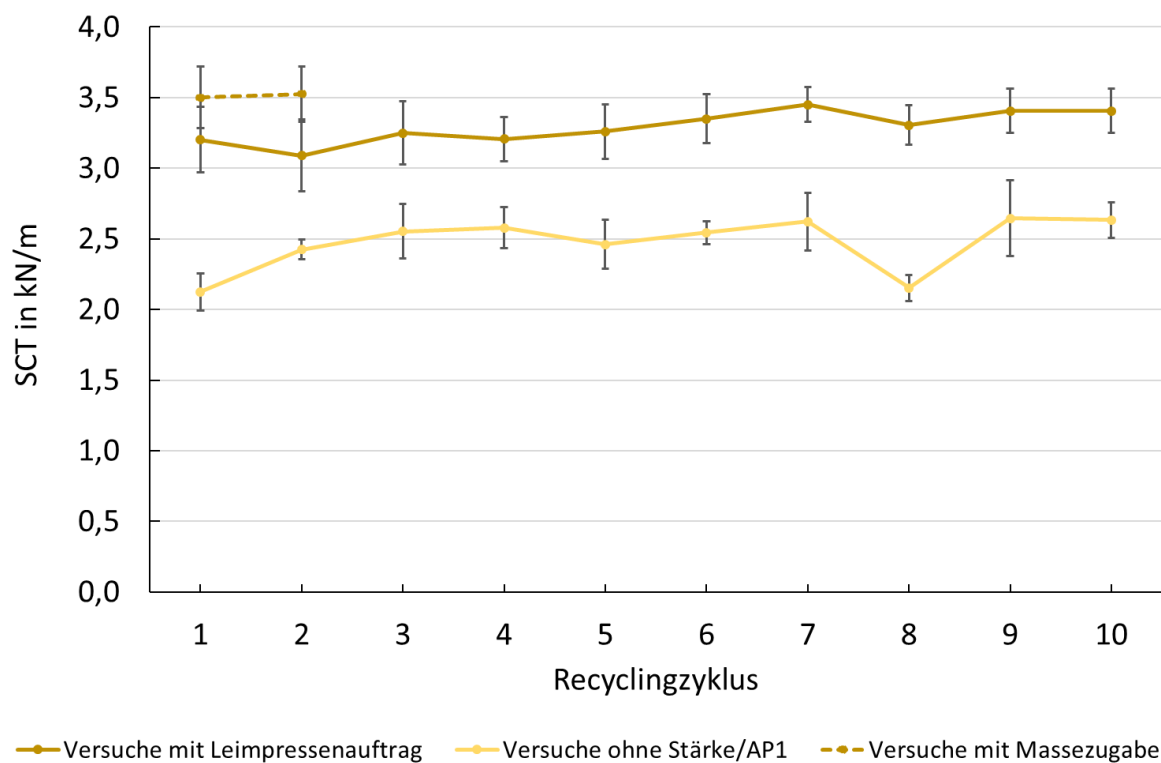


Abbildung 5-22: Veränderung des SCT-Wertes im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)



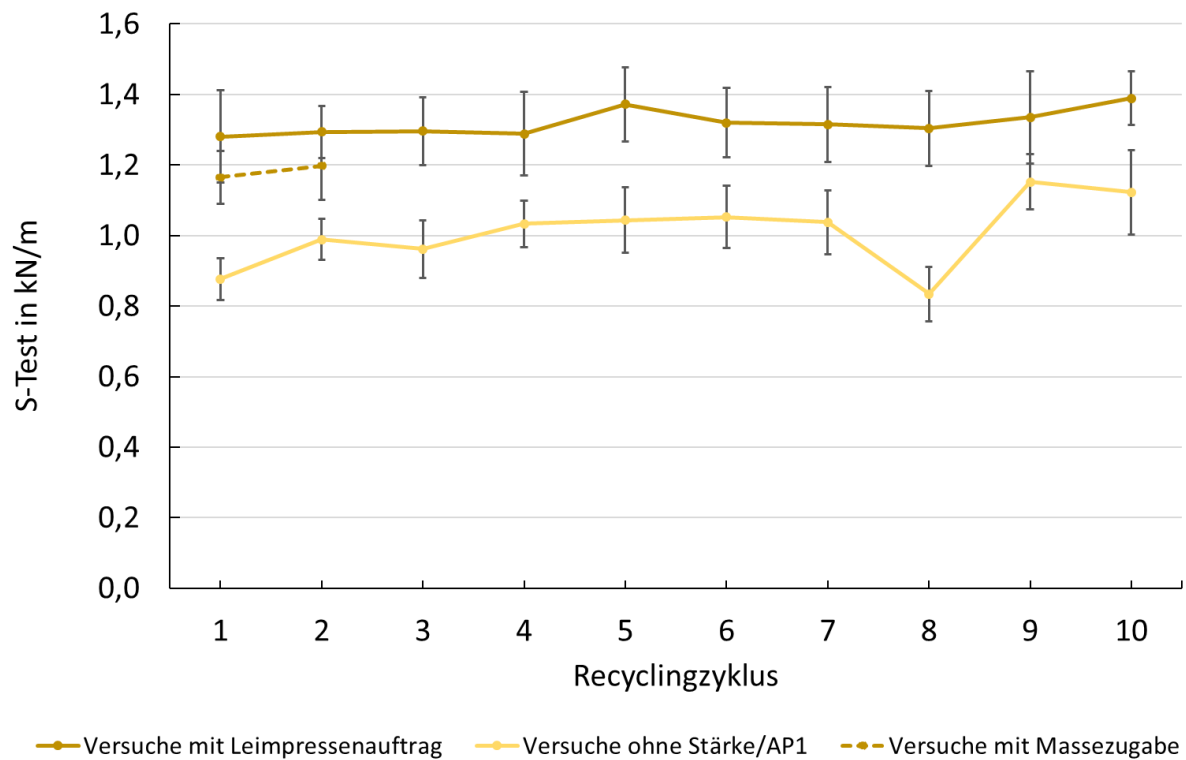


Abbildung 5-23: Veränderung der Werte des S-Tests im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

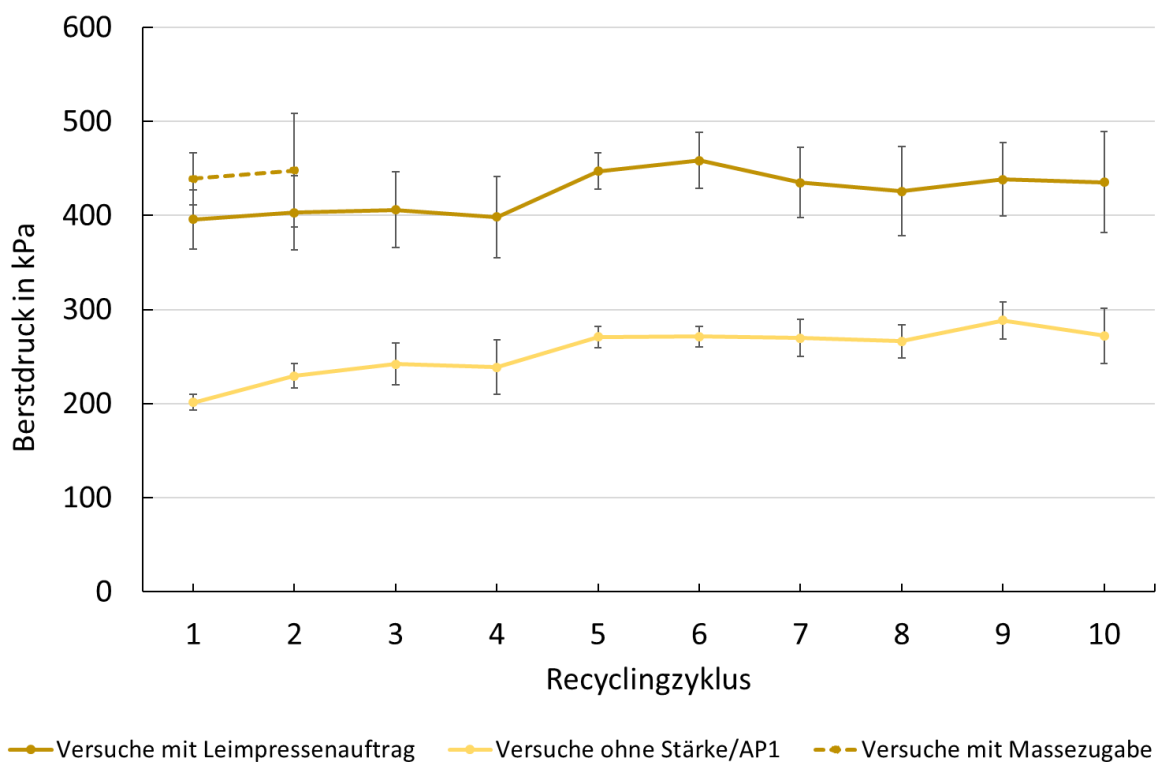


Abbildung 5-24: Veränderung des Berstdrucks im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

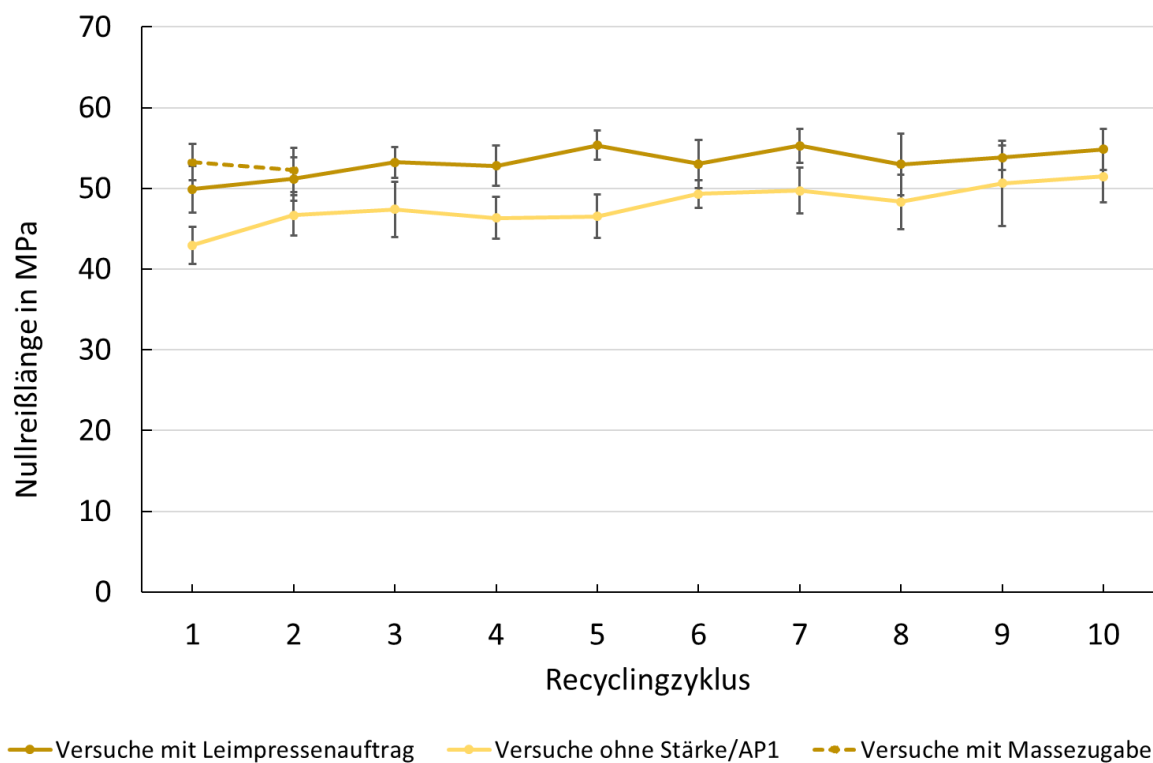


Abbildung 5-25: Veränderung der Nullreißlänge im Mehrfachrecycling ohne und mit Stärkezugabe (Leimpresse und Masse)

### 5.3 Arbeitspaket 3: Wellpappenherstellung

In AP 3 wird der Einfluss der industriellen Wellpappenherstellung auf das Recyclingpotential untersucht. Zunächst werden die Ergebnisse für industriell hergestellte Wellpappenproben vorgestellt (Kapitel 5.3.1) und anschließend die Ergebnisse der Versuche im Pilotmaßstab (Kapitel 5.3.2).

#### 5.3.1 Industrielle Wellpappenproben

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Prüfung von Suspensionen und Laborblättern, die aus industrieller Wellpappe (WP), der massegleichen Mischung der verwendeten Wellpappenrohapiere (WP-Rohpapier Mix) sowie der massegleichen Mischung der verwendeten Wellpappenrohapiere mit Stärkeauftrag (WP-Rohpapier Mix + Stärke) bestehen. Der Stärkeleim aus der ursprünglichen Wellpappenproduktion der Proben D und E war für die Untersuchungen leider nicht mehr verwendbar, sodass bei diesen beiden Proben die Werte der WPRP-Mischung mit Stärkeauftrag fehlen.

Suspensionsprüfung

In Abbildung 5-26 bis Abbildung 5-29 sind die Ergebnisse der Suspensionsprüfung für die fünf Proben (A bis E) dargestellt. Die Ergebnisse des SR-Wertes sind im Bereich der Messgenauigkeit für die Proben B bis E im gleichen Bereich. Lediglich Probe A weist für den WPRP-Mix einen erhöhten SR Wert auf. Dieser erhöhte Wert könnte auf geringe Abweichungen bei der Mix-Zusammensetzung zurückzuführen sein, indem der Anteil des WS etwas zu hoch ist. Die Ergebnisse für das WRV zeigen mit Ausnahme der WP der Probe C nur minimale Veränderungen.

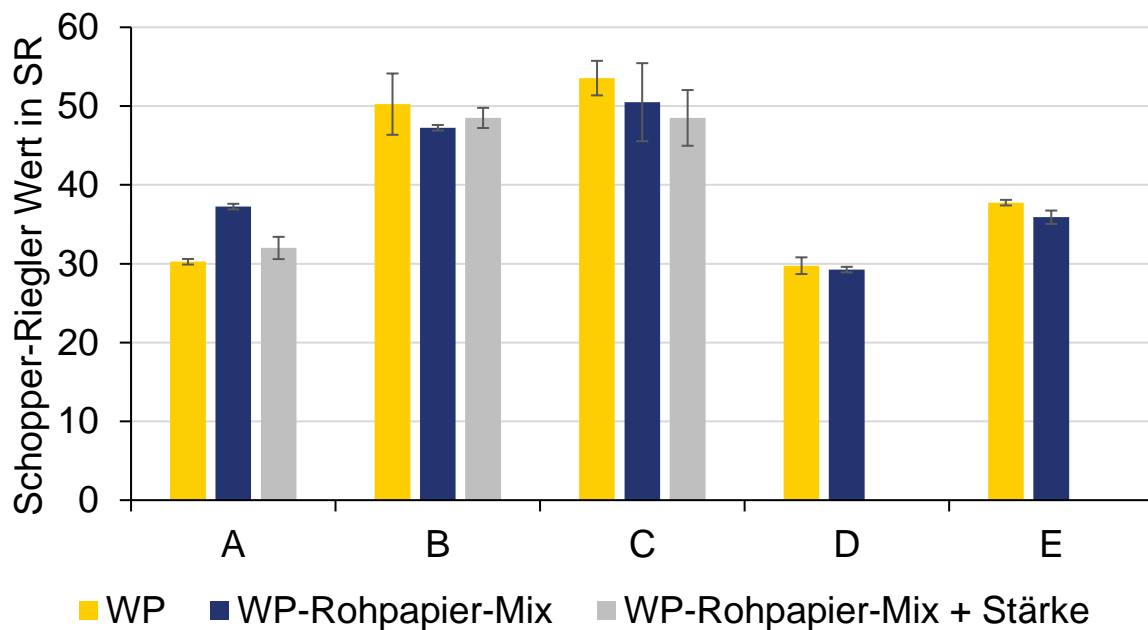


Abbildung 5-26: Vergleich des SR-Wertes durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke

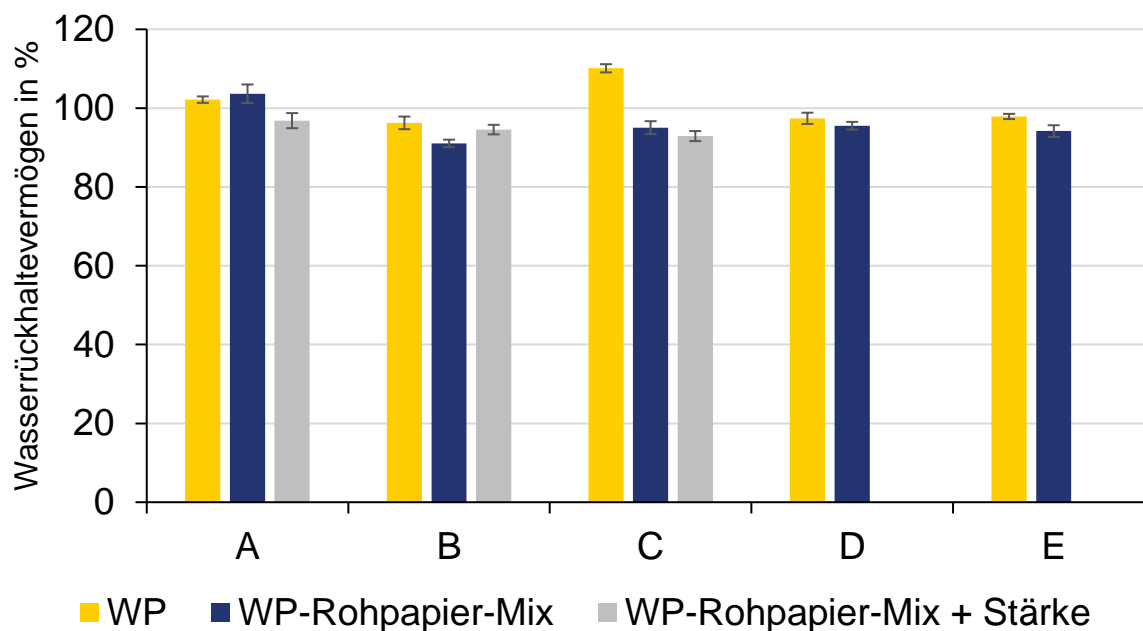


Abbildung 5-27: Vergleich des WRV-Wertes durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke

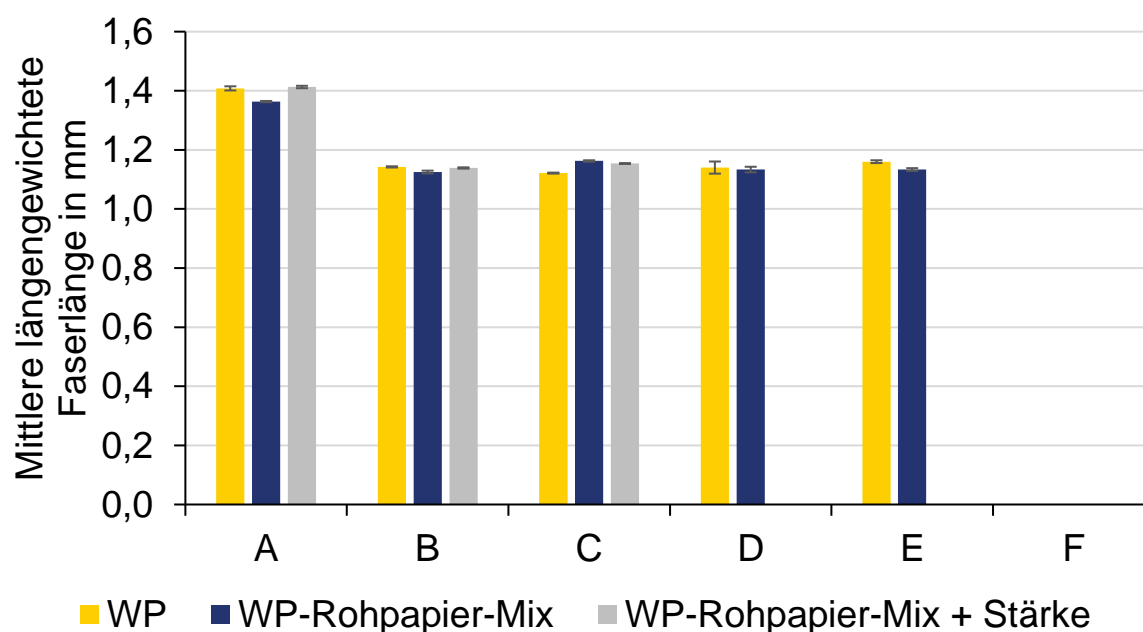


Abbildung 5-28: Vergleich der mittleren längengewichteten Faserlänge durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke

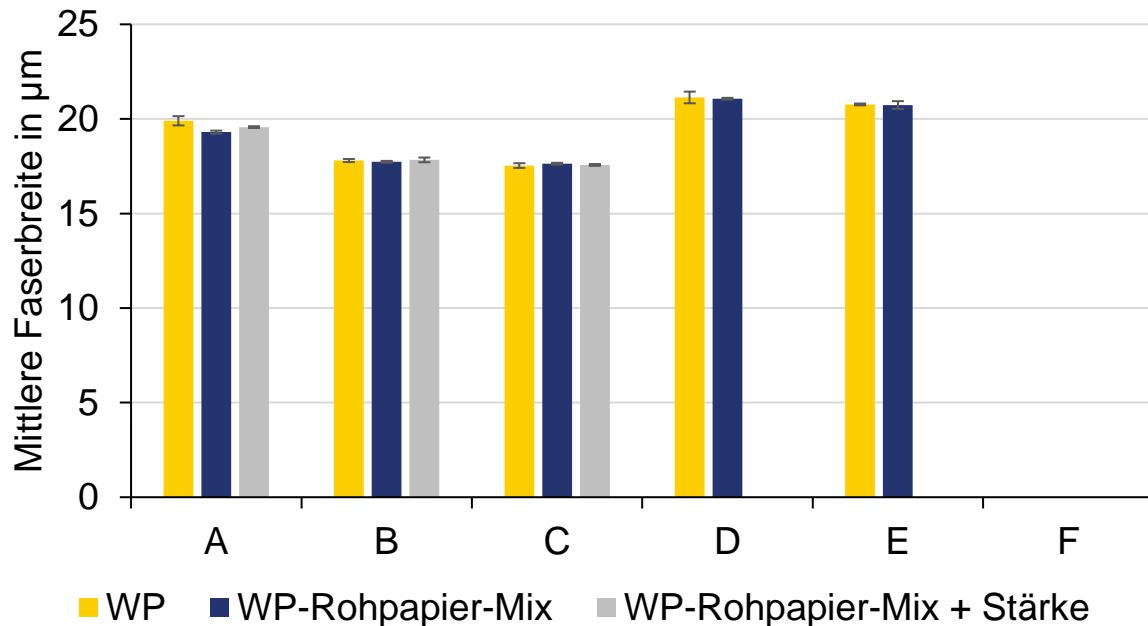


Abbildung 5-29: Vergleich der mittleren Faserbreite durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke

Die Ergebnisse des Fiber Analyzers (Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29) zeigen keinerlei Veränderungen bei der mittleren Faserlänge und –breite. Anhand der Ergebnisse der Suspensionsprüfung kann kein Einfluss der Verarbeitung von Wellpappenroh papier zu Wellpappe und der Applikation von Stärke zur Verklebung der Lagen identifiziert werden. Die Menge der Stärke scheint so gering zu sein, dass sie im nächsten Zyklus keinen Einfluss auf die Suspension nimmt.

#### Laborblattprüfung

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 5-30 bis Abbildung 5-36) sind die Ergebnisse der mechanischen Prüfung der Laborblätter dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen für Reißlänge, CMT, RCT, SCT, S-Test, Berstdruck und Nullreißlänge stimmen im Rahmen der Streubreite für die Wellpappe, den WPRP-Mix und den Mix mit Stärkeauftrag nahezu überein. Tendenziell weisen die Werte der Wellpappe für die einzelnen Proben leicht höhere Mittelwerte auf als der WPRP-Mix mit und ohne Stärkeapplikation. Aufgrund der Ergebnisse aus AP 2 wären leicht höhere Festigkeitskennwerte der Proben mit Störkeeintrag zu erwarten gewesen. Die applizierte Stärkemenge bei der Wellpappenherstellung scheint jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften nach dem Recycling zu nehmen.

Auch anhand der Ergebnisse für die mechanische Prüfung der Laborblätter kann kein eindeutiger Einfluss der Wellpappenherstellung auf Veränderungen der Eigenschaften des Fasermaterials identifiziert werden.

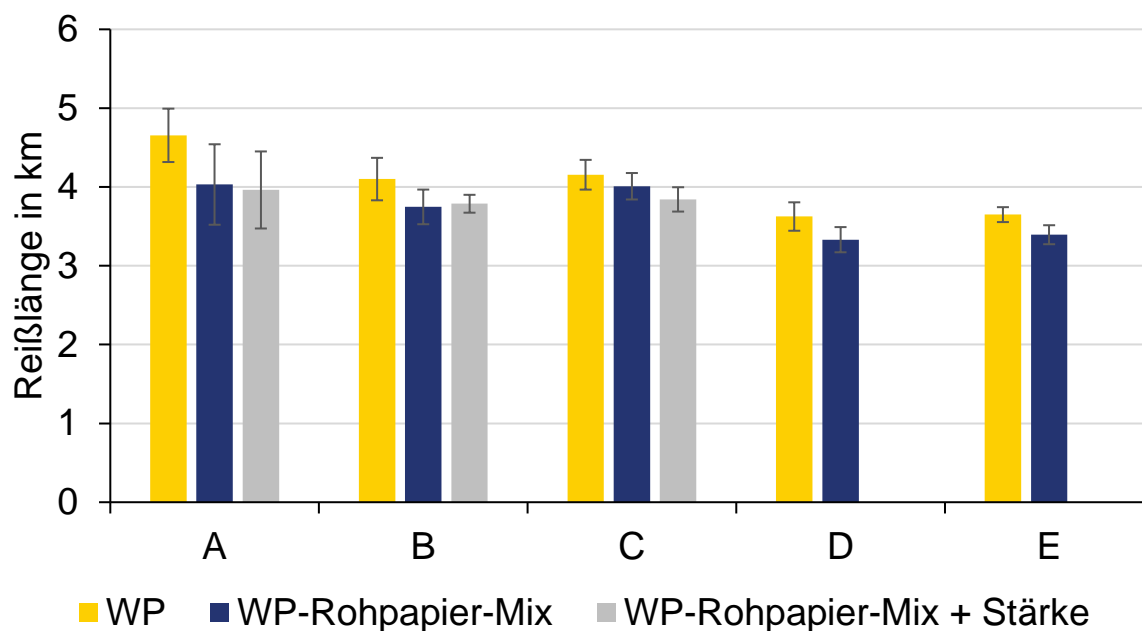


Abbildung 5-30: Vergleich der Reißlänge durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke

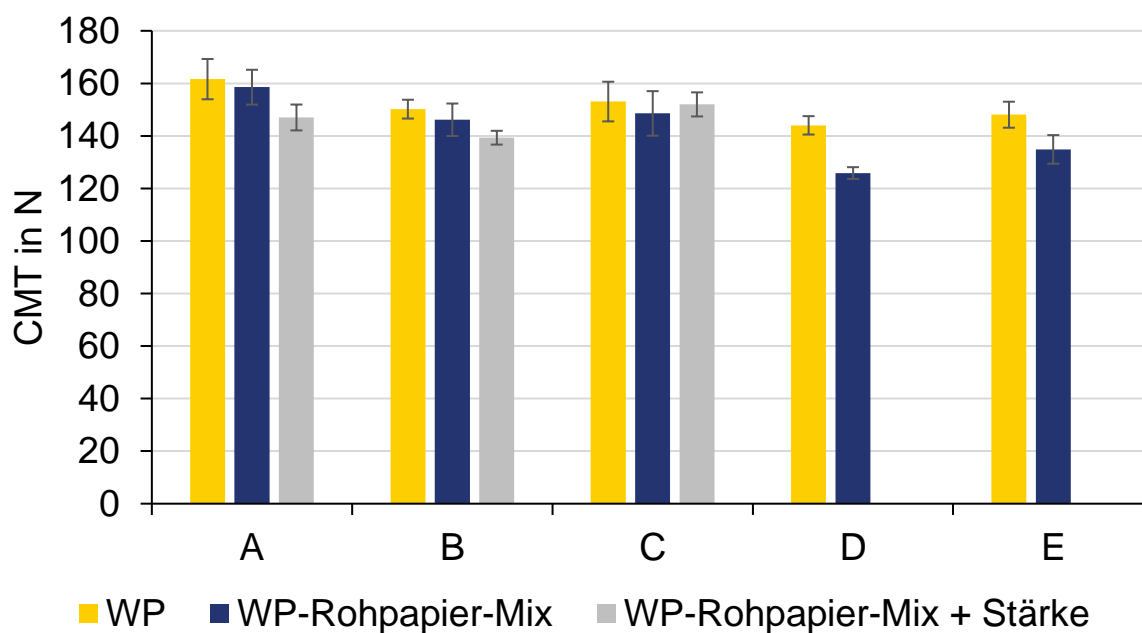


Abbildung 5-31: Vergleich des CMT-Wertes durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke

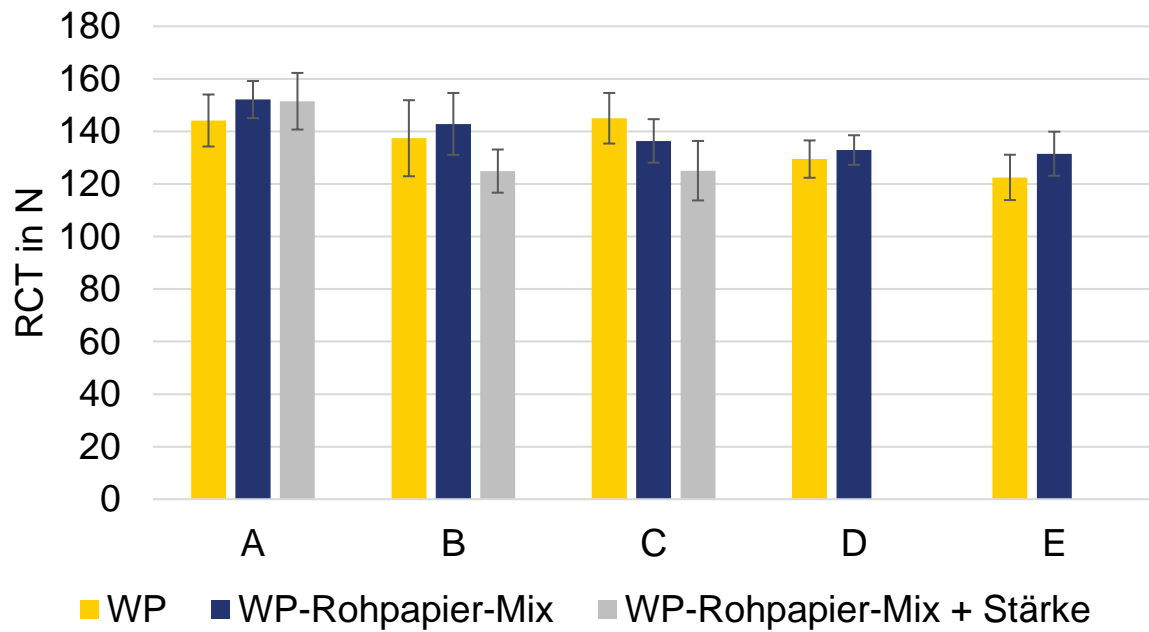


Abbildung 5-32: Vergleich des RCT-Wertes durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke

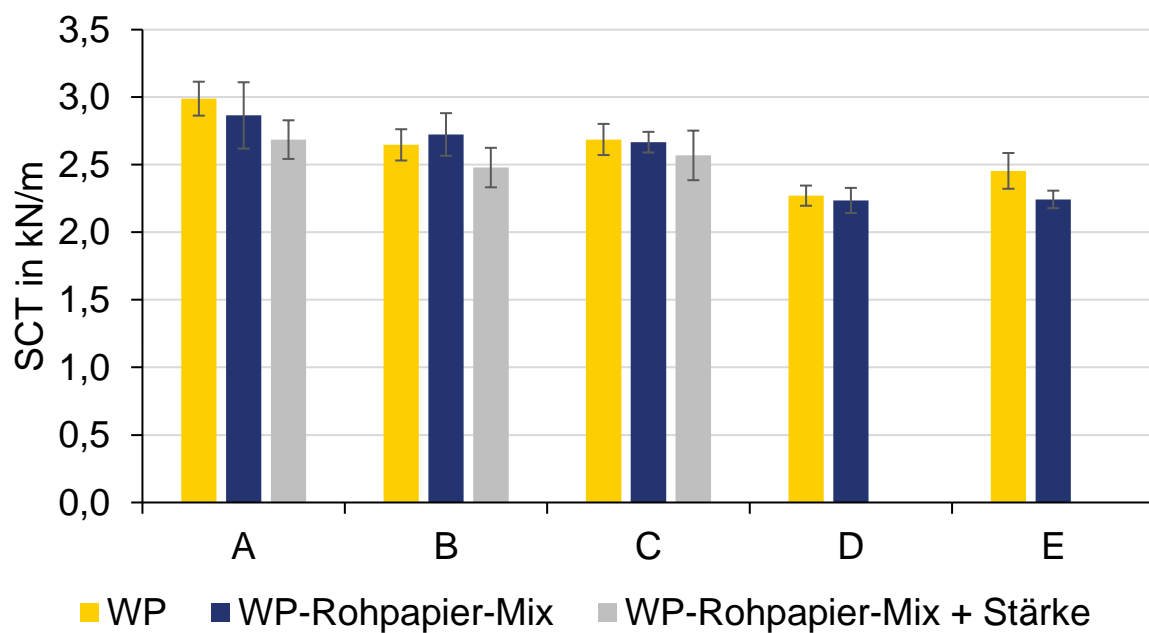


Abbildung 5-33: Vergleich des SCT-Wertes durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke

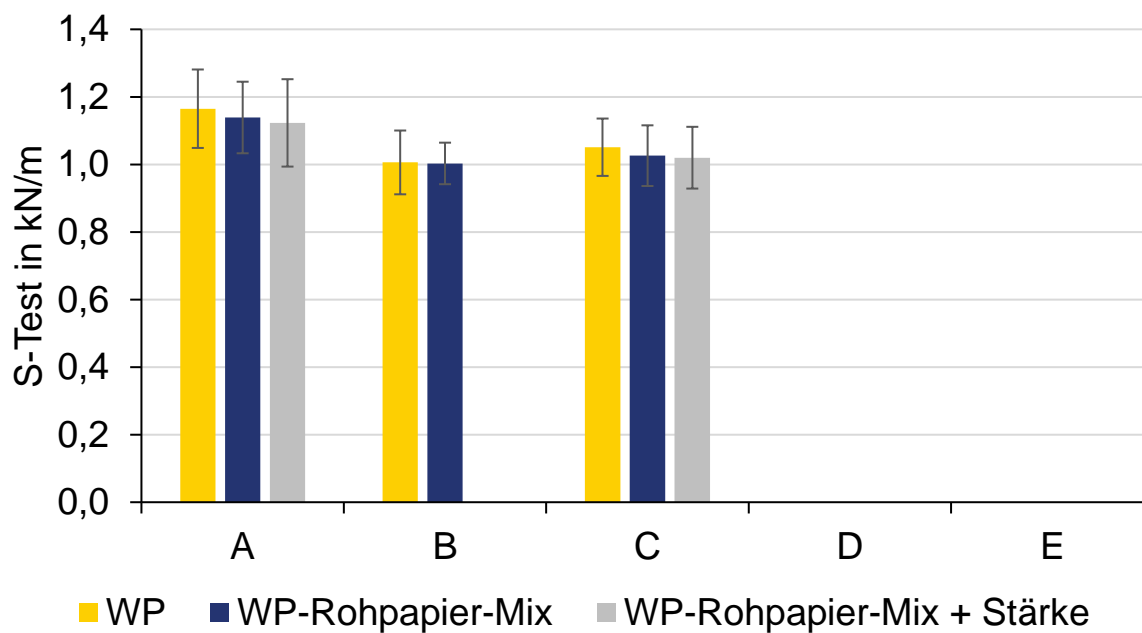


Abbildung 5-34: Vergleich der Werte des S-Test durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke

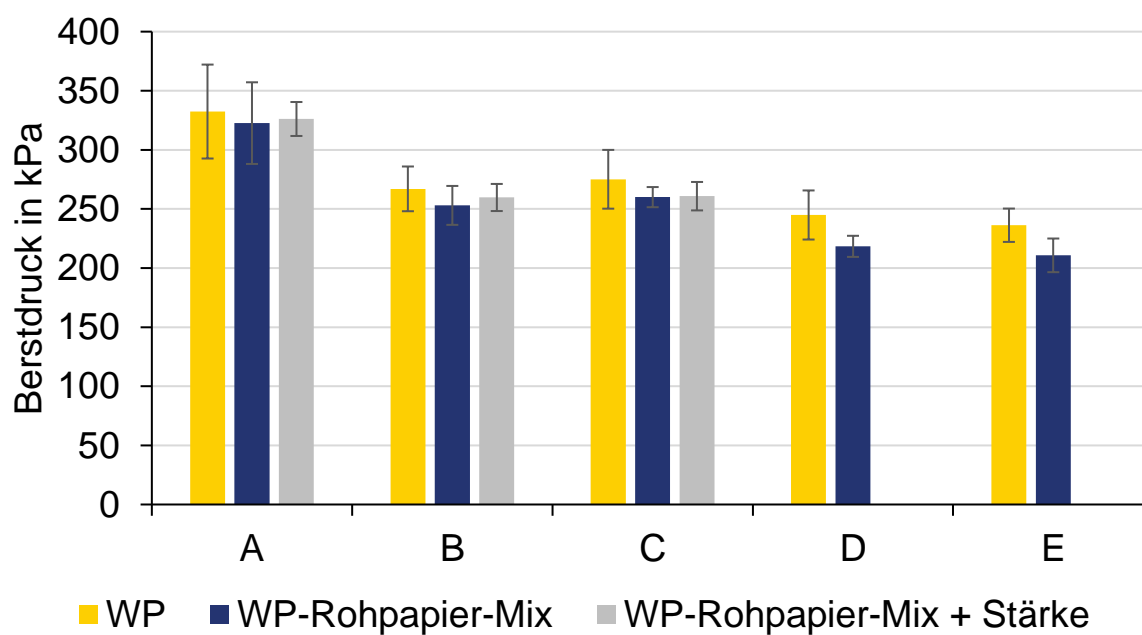


Abbildung 5-35: Vergleich der Werte des Berstdruck durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke



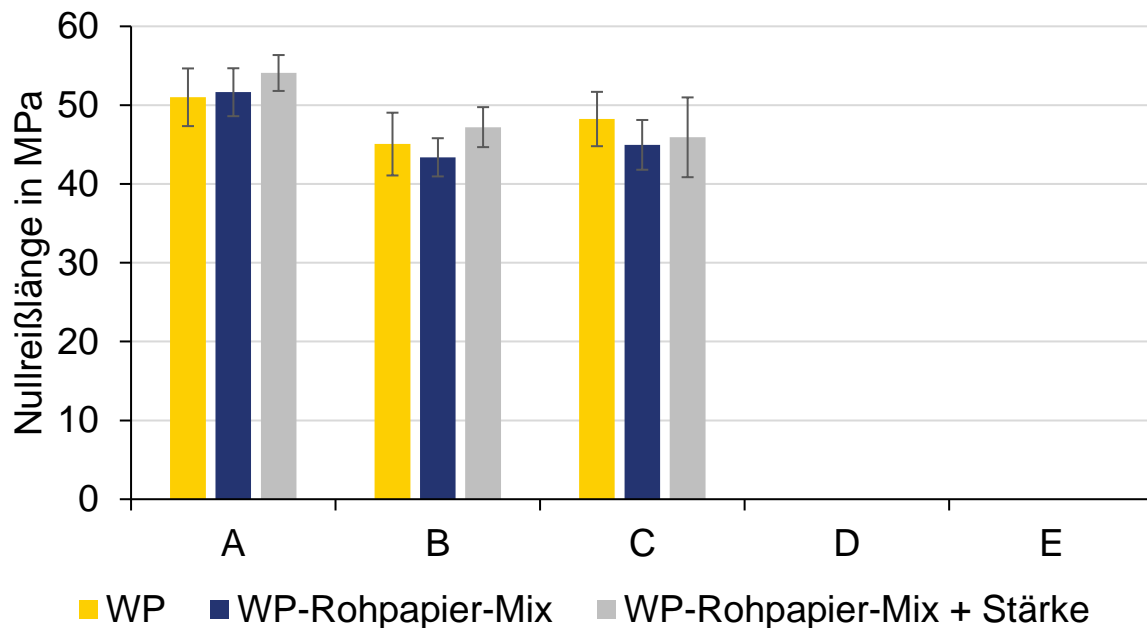


Abbildung 5-36: Vergleich der Werte der Nullreißlänge durch die Verarbeitung von WPRP zu Wellpappe und die Applikation von Stärke

### 5.3.2 Pilotversuche Wellpappenherstellung

Die Ergebnisse der Pilotversuche (Abbildung 5-37 bis Abbildung 5-47) ermöglichen eine Aussage über die Einflüsse verschiedener Produktionsbedingungen der Wellpappenherstellung auf das gleiche Ausgangsmaterial (Wellenpapier). In fünf Versuchsreihen wurden für vier Wellenpapiere die Betriebsbedingungen Temperatur, Anpressdruck an der Riffelwalze und Anlagengeschwindigkeit variiert. Als Referenz sind die Werte des jeweiligen unverarbeiteten Rohpapiers angegeben. Die Betriebsbedingungen werden von Extrembedingungen mit hohem Anpressdruck bei geringer Anlagengeschwindigkeit ohne vorheizen der Papiere („kalt“) bis hin zu den Standardbedingungen für die Versuchsanlage („heiß 3“) variiert.

#### Suspensionsprüfung

Die SR-Werte (Abbildung 5-37) zeigen insbesondere bei der Versuchsreihe „kalt“ deutliche Veränderungen in Form von reduzierten SR-Werten gegenüber dem Ausgangsmaterial. Diese Auswirkung ist für das Frischfasermaterial (NSSC-Fluting) deutlich stärker als für die Recyclingmaterialien. Die Verarbeitung unter Standardbedingungen wirkt sich ebenfalls reduzierend auf den SR-Wert auf. Bei den anderen Versuchsreihen kann keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Ein ähnliches Bild wie für den SR-Wert zeigt sich auch für den WRV-Wert (Abbildung 5-38).

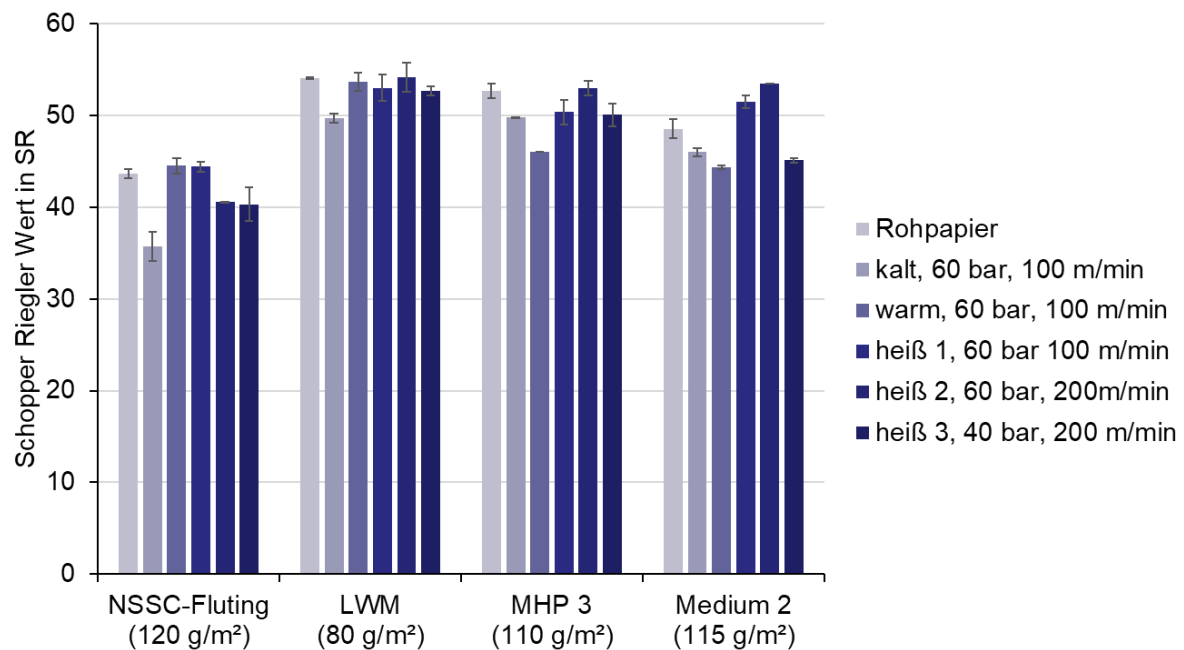


Abbildung 5-37: SR-Wert bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

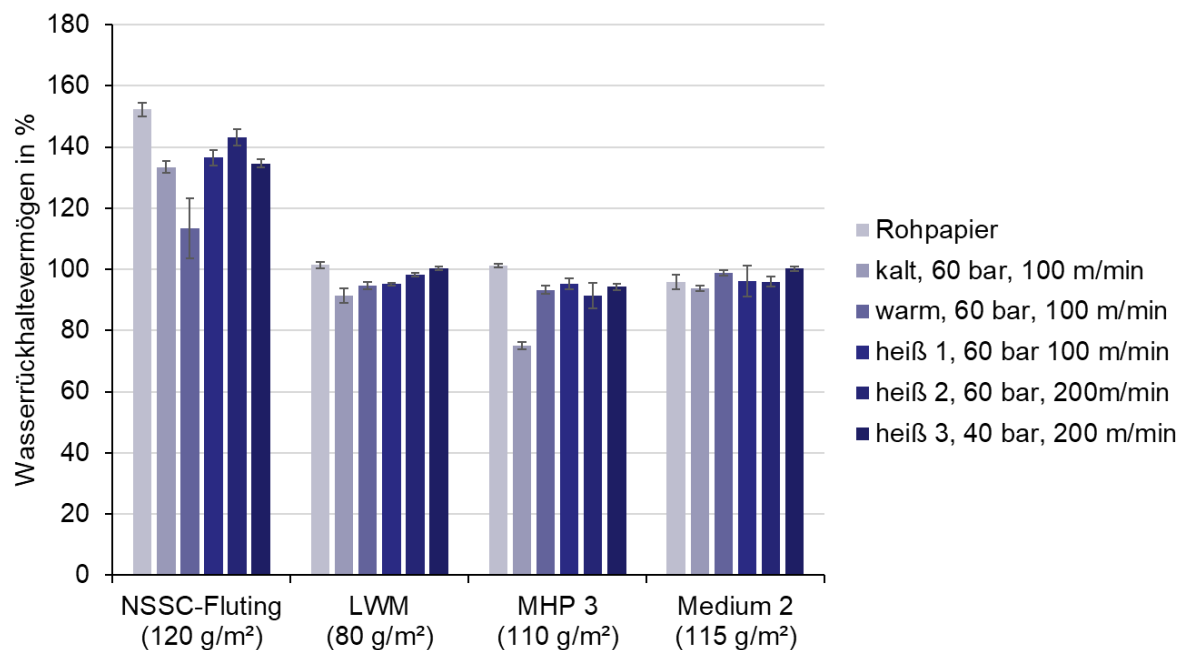


Abbildung 5-38: WRV-Wert bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

Die Wellenumformung bei der Welllappenherstellung sollte eigentlich keinen positiven Einfluss auf die Faserlänge haben. Die Untersuchungsergebnisse weisen aber durch die Verarbeitung der Papiere auf eine Zunahme der mittleren längengewichteten Faserlänge (Abbildung 5-39) hin. Die Zunahme fällt dabei für die Recyclingpapiere stärker aus als für das Frischfasermaterial. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass der deutlich größere Anteil von Fein- und insbesondere Füllstoffen in den

Recyclingpapieren durch die Wellenbildung und den dabei herrschenden Anpressdruck sowie der erhöhten Temperatur an die Fasern gebunden werden und somit im Fiber Analyzer nicht als Fein- oder Füllstoffe detektiert werden.

Eine deutliche Veränderung der Fasermorphologie zeigt sich bei der mittleren Faserbreite (Abbildung 5-40). Alle verarbeiteten Papiere weisen eine stark reduzierte Faserbreite auf. Der Einfluss der einzelnen Betriebsbedingungen kann anhand der Daten nicht detailliert aufgeschlüsselt werden. Die Vermutung liegt jedoch nahe, dass vor allem der Anpressdruck und die Anlagengeschwindigkeit (Verweilzeit im Corrugator) den maßgeblichen Einfluss ausüben. Der Effekt ist für das Frischfasermaterial besonders stark. Die verringerte mittlere Faserbreite kann auf das Kollabieren des Faserlumens und das Komprimieren des Faserquerschnitts durch den Anpressdruck zurückgeführt werden. Dabei scheinen die Fasern bei 40 bar Anpressdruck bereits stark komprimiert zu sein, da eine weitere Erhöhung des Anpressdruckes auf 60 bar keine weitere Komprimierung nach sich zieht.

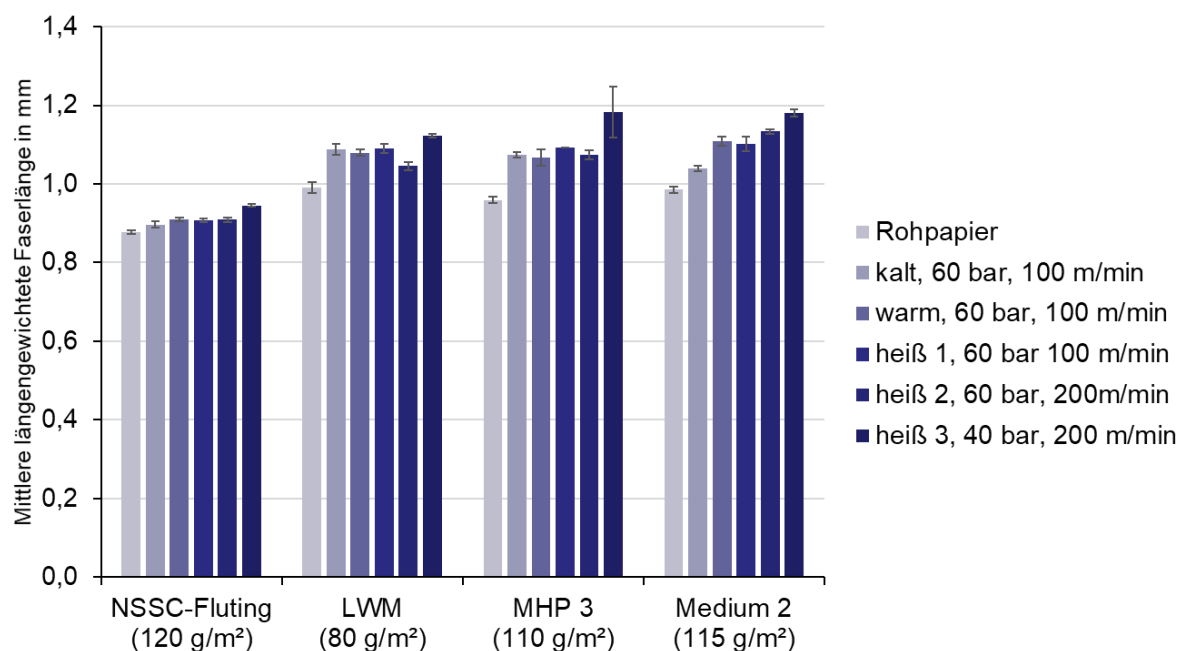


Abbildung 5-39: Mittlere längengewichtete Faserlänge bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

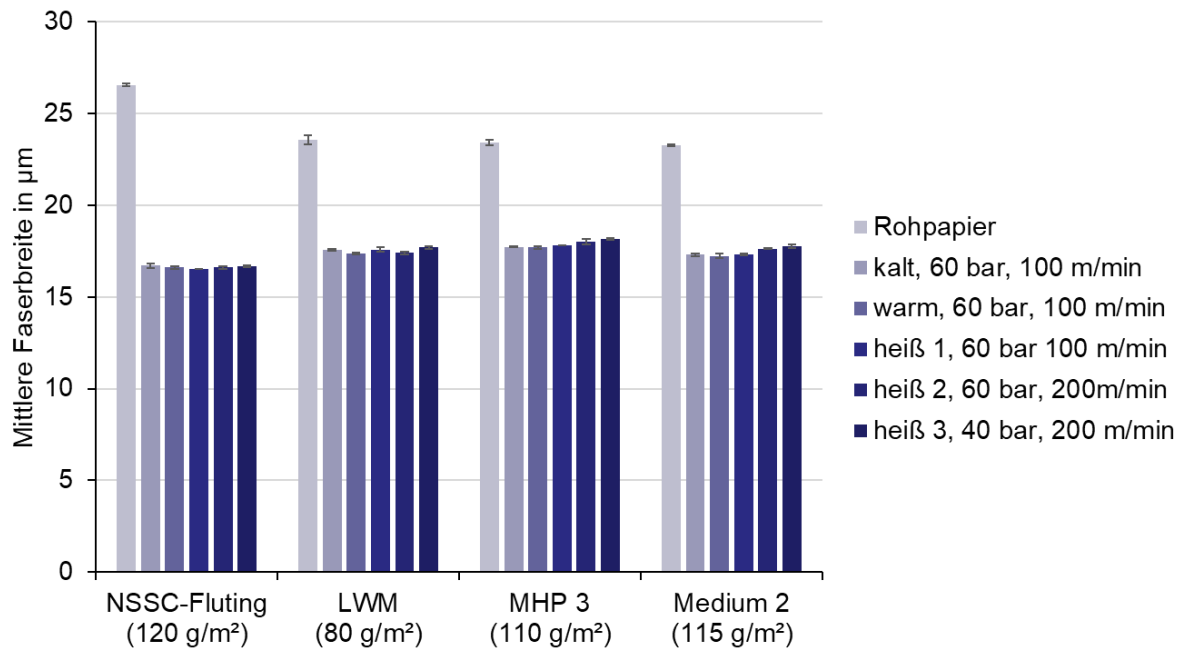


Abbildung 5-40: Mittlere Faserbreite bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

### Laborblattprüfung

Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung der Laborblätter sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die deutlichen Auswirkungen auf die Fasermorphologie zeigen sich jedoch nicht in den Ergebnissen der Laborblattprüfung. Die Prüfergebnisse der Reißlänge (Abbildung 5-41), des CMT (Abbildung 5-42), des SCT (Abbildung 5-44), des S-Test (Abbildung 5-45), des Berstdrucks (Abbildung 5-46) und der Nullreißlänge (Abbildung 5-47) befinden sich im Bereich des jeweiligen Rohpapiers. Für den RCT-Wert (Abbildung 5-43) können durch die Verarbeitung zu gewelltem Papier sogar leicht erhöhte Werte gemessen werden.

Die Ergebnisse legen nahe, dass die Wellenbildung zwar Auswirkungen auf die Fasermorphologie, insbesondere die mittlere Faserbreite, nimmt, dies jedoch keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Laborblätter im Vergleich zu Laborblättern aus dem unverarbeiteten Ausgangsmaterial hat.

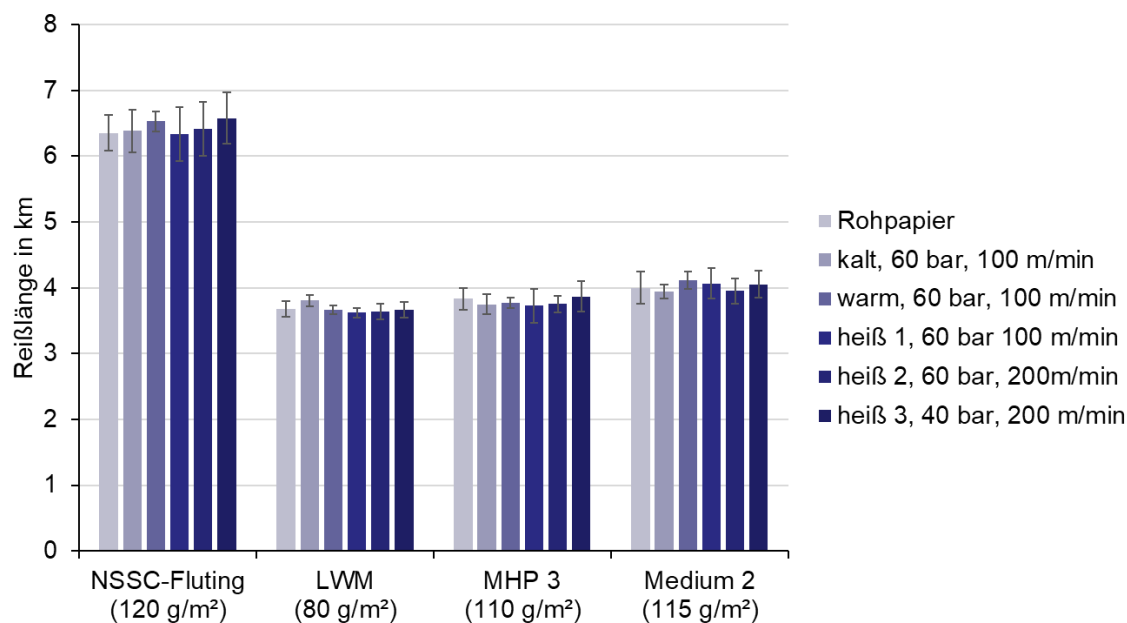


Abbildung 5-41: Reißlänge bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

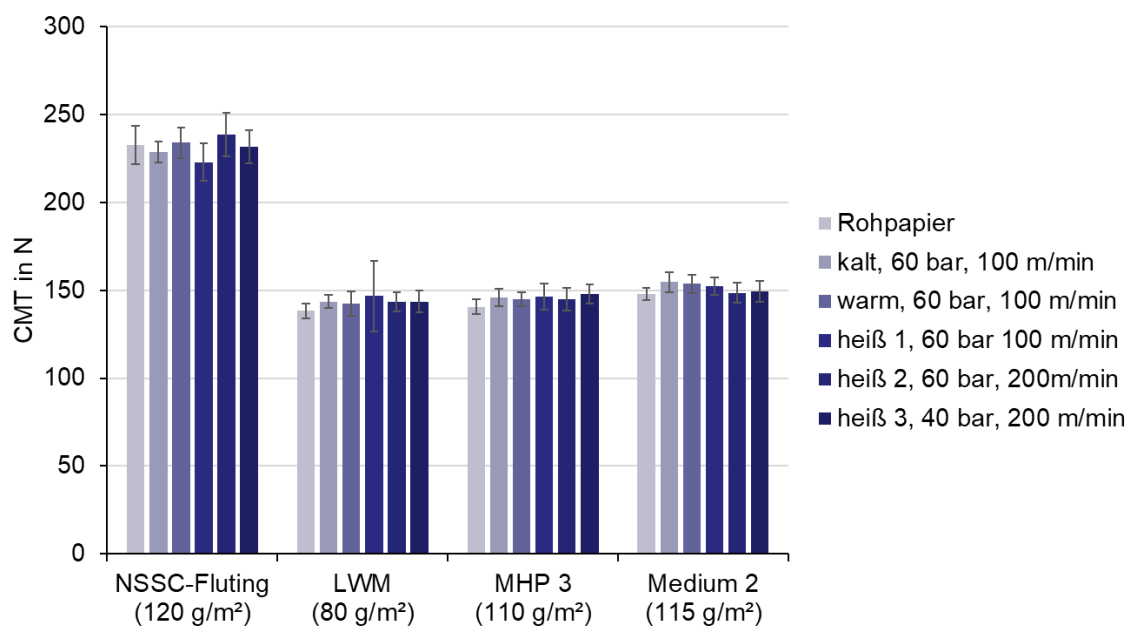


Abbildung 5-42: CMT-Wert bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

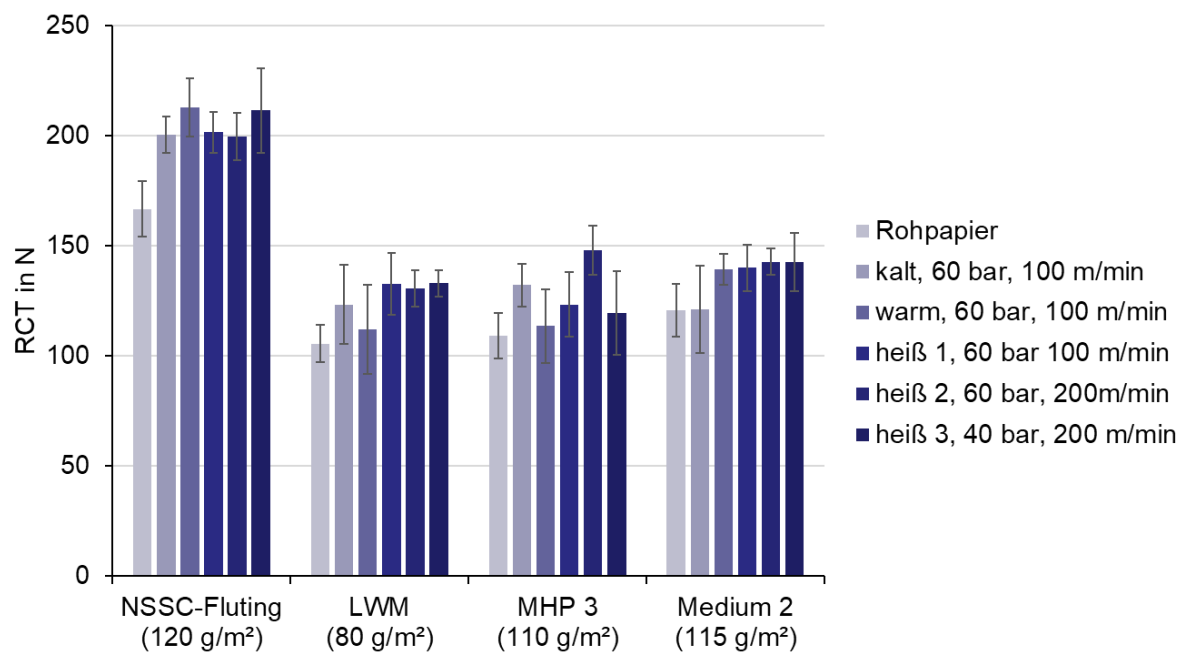


Abbildung 5-43: RCT-Wert bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

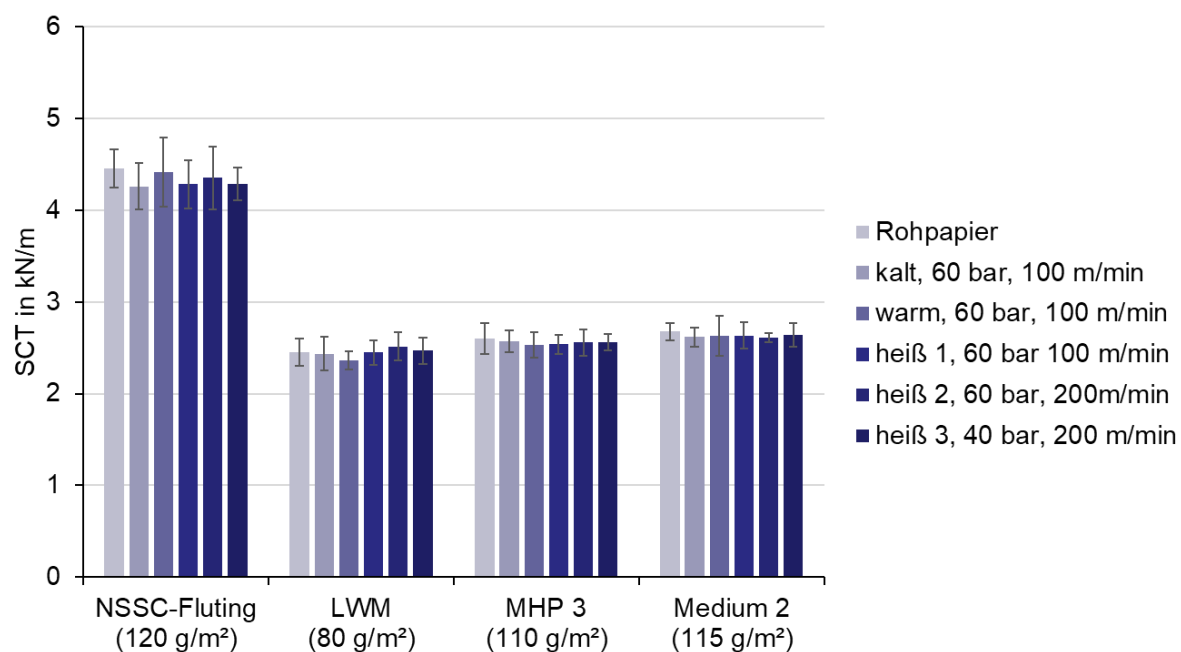


Abbildung 5-44: SCT-Wert bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

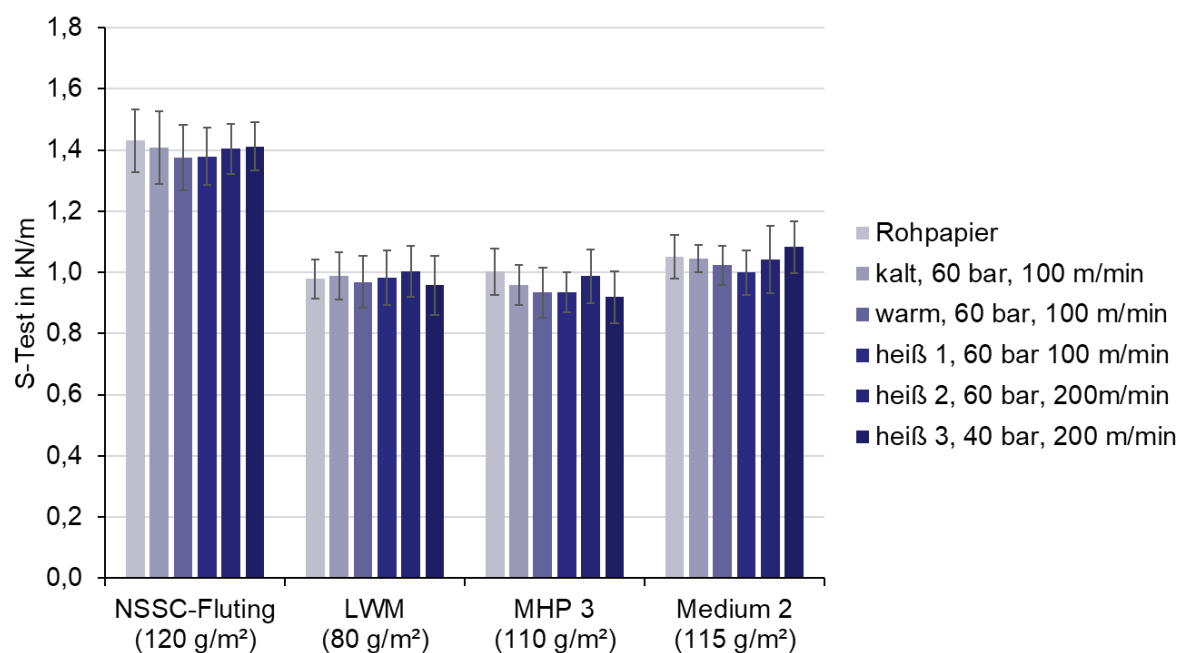


Abbildung 5-45: S-Test-Wert bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

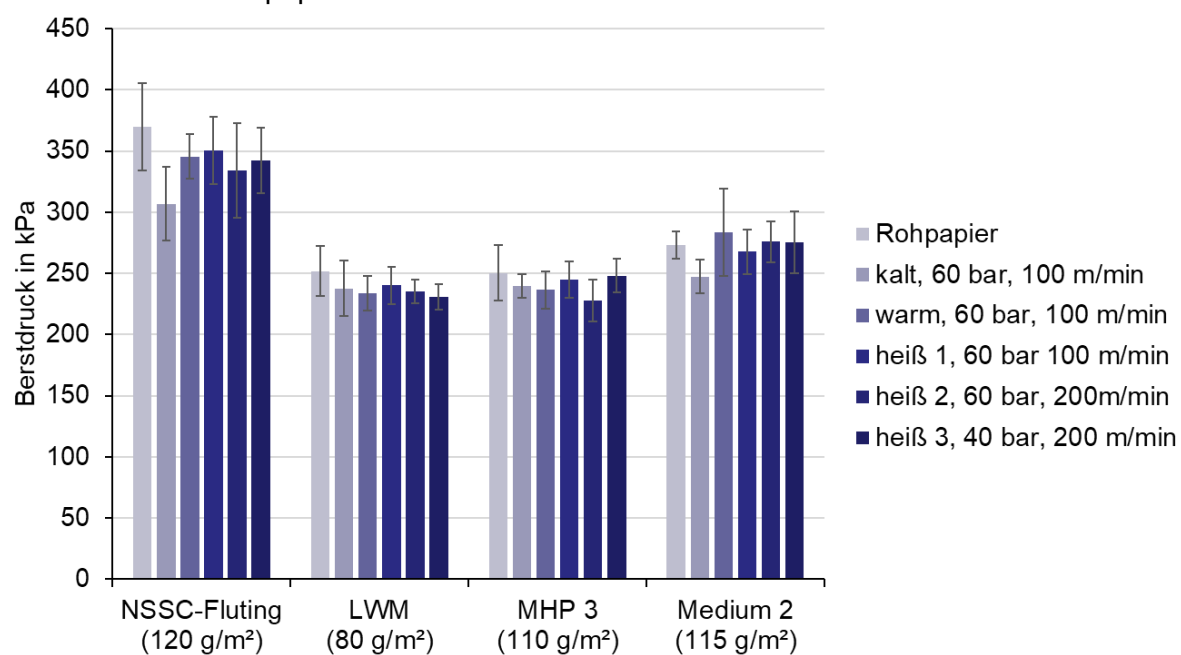


Abbildung 5-46: Berstdruck bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

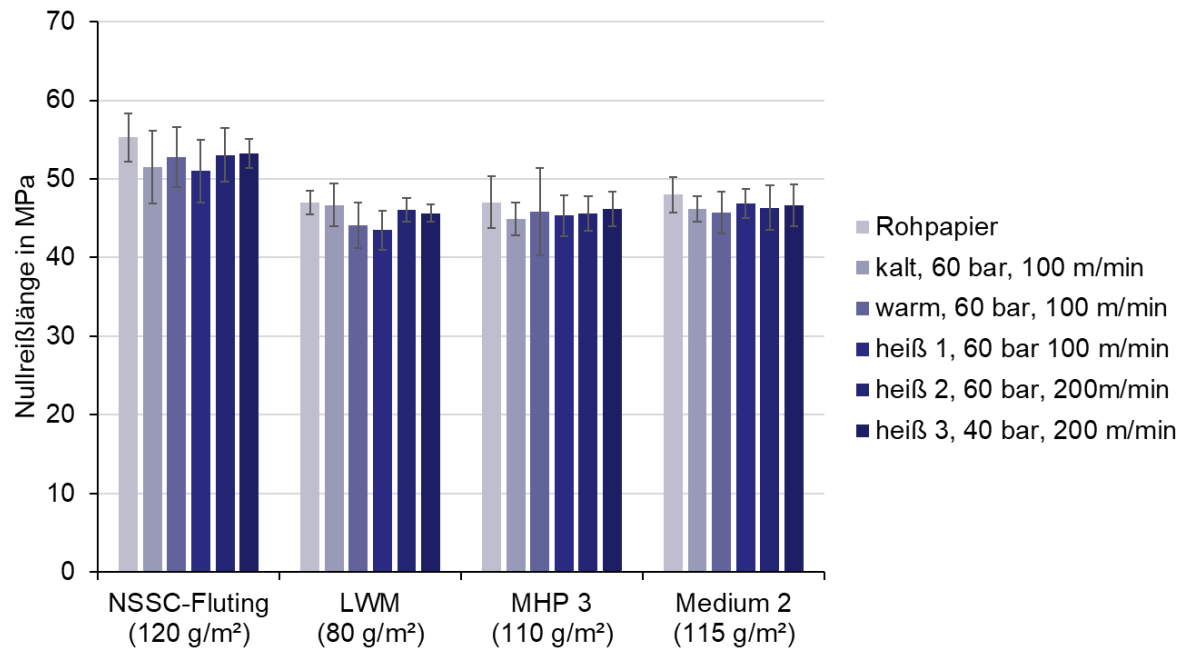


Abbildung 5-47: Nullreißlänge bei verschiedenen Produktionsbedingungen für gewellte Wellenpapiere

Die Ergebnisse der beiden Untersuchungen dieses Arbeitspaketes zeigen eine Auswirkung der Wellenbildung und der Wellpappenproduktion auf das Fasermaterial, insbesondere in Form einer abnehmenden mittleren Faserbreite. Dies bewirkt jedoch keine signifikante Änderung der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum unverarbeiteten Ausgangsmaterial. Für den Pilotversuch kann somit die Verarbeitung des Papiers zu Wellpappe vernachlässigt werden.

#### 5.4 Arbeitspaket 4: Pilotversuch

Aufgrund der Ergebnisse der vorherigen Arbeitspakete wird im Pilotversuch auf die Applikation von Stärke und die Produktion von Wellpappe aus dem mehrfach recycelten Papier verzichtet. Die Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass diese beiden Verfahrensschritte keinen signifikanten Einfluss auf das Recyclingpotential des Papiers haben. Vielmehr wirkt sich der Füllstoffgehalt auf die Kennwerte aus. Der Mehrfachrecycling-Pilotversuch an Wellpappenrohpapieren wurde in insgesamt 16 Zyklen durchgeführt. Für die Vergleichbarkeit zu den Laborergebnissen aus AP 1 wird auf die Zugabe von Füllstoffen in den ersten 15 Zyklen verzichtet. In Zyklus 16 wurde der Suspension Calciumcarbonat zugegeben, um den Glührückstand auf das Ausgangsniveau des eingesetzten Papiers anzuheben (Abbildung 5-48). Daher sind in den folgenden Abbildungen die Messwerte des 16. Zyklus losgelöst von den vorherigen Ergebnissen zu betrachten. Der Verlust des Glührückstandes wurde im 16. Zyklus mit einem Gesamtglührückstand von 15,3 % überkompensiert, da die Retention



des Calciumcarbonats (11,6 % in Zyklus 16) ohne Zugabe von Retentionsmitteln besser war als erwartet. Die Messwerte von Zyklus 16 sind somit nicht direkt mit Zyklus 1 vergleichbar und daher nicht in der Abbildung eingetragen. Dennoch zeigt sich, wie bei den Laborversuchen, anfangs eine stärkere Abnahme des Glührückstandes als im späteren Verlauf des Mehrfachrecyclings. Innerhalb der ersten 15 Zyklen ist der Verlust an Calciumcarbonat mit 4 % etwa doppelt so groß wie der Kaolinverlust (ca. 2 %). Zum Vergleich sind in den folgenden Abbildungen ebenfalls die Messwerte der Laborversuche dargestellt. Die Laborversuche wurden mit einer Papiermischung gleicher Zusammensetzung (20 % KL, 40 % TL3, 40 % WS) aber nicht den identischen Papieren durchgeführt. Die benötigten Mengen der Rohpapiere waren nicht mehr verfügbar.

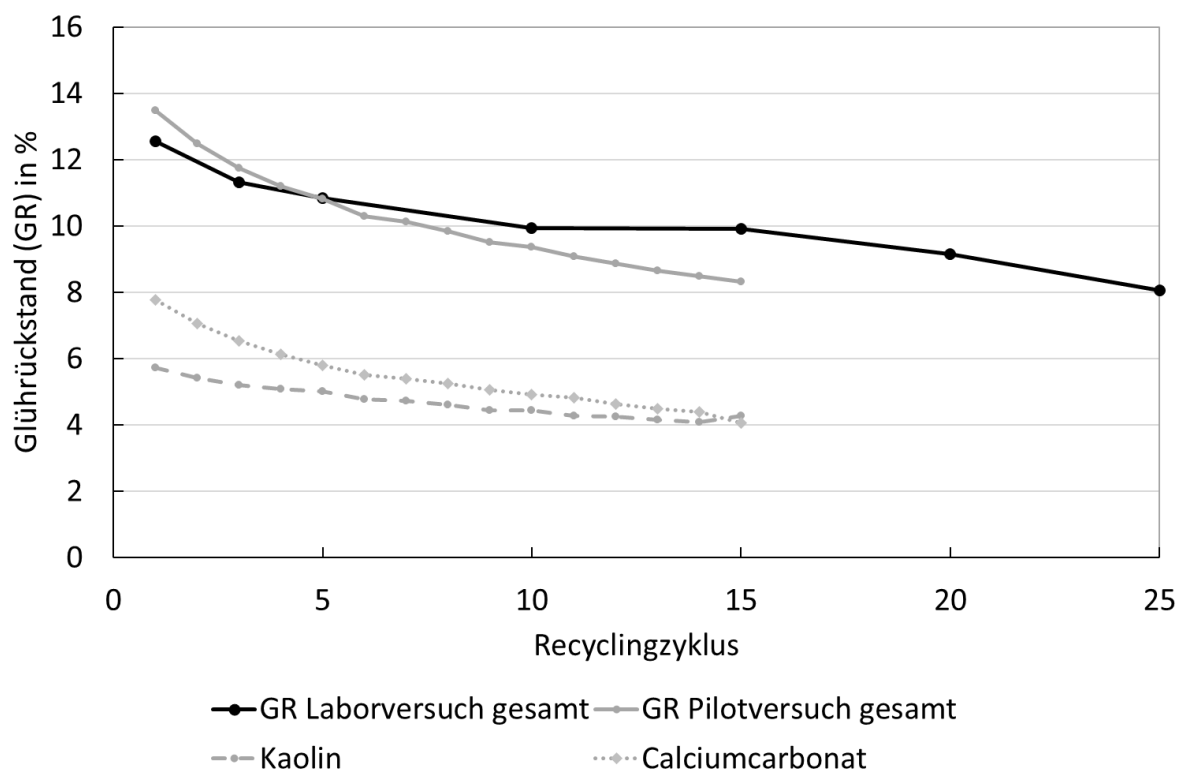


Abbildung 5-48: Glührückstand im Verlauf des Mehrfachrecycling-Labor- und Pilotversuches

### Suspensionsprüfung

Die Ergebnisse der Suspensionsprüfung sind in den folgenden Grafiken dargestellt. Zum Vergleich sind ebenfalls die Ergebnisse der Laboruntersuchungen (AP 1) für die WPRP-Mischung gleicher Zusammensetzung abgebildet. Die SR-Werte im Pilotversuch zeigen anfangs eine steigende Tendenz und schwanken ab Zyklus 6 um einen SR-Wert von  $45 \pm 3$  SR (Abbildung 5-49). Die Werte der Versuche im Labormaßstab

zeigen anfangs auch eine ansteigende Tendenz, fallen jedoch ab Zyklus 10 leicht ab. Die Werte des WRV entwickeln sich für Labor- und Pilotversuche nahezu parallel mit leicht abfallender Tendenz (Abbildung 5-50).

Sowohl die Untersuchungen der Labor- als auch der Pilotversuche zeigen keine signifikante Veränderung der mittleren Faserlänge (Abbildung 5-51). Im Vergleich zu den Laboruntersuchungen ist für die mittlere Faserbreite der Pilotversuche eine geringe Abnahme erkennbar (Abbildung 5-52). Diese Abnahme der Faserbreite könnte durch den, im Vergleich zum Rapid-Köthen-Verfahren (Vakuumtrocknung bei  $\Delta p$  0,8 bar), höheren Pressdruck ( $\Delta p$  4,2 bar) in der Pilotpapiermaschine induziert sein und somit den Faserquerschnitt im Verlauf des Mehrfachrecyclings reduzieren. Dies konnte auch in AP 3 bei deutlich höheren Drücken (40 bzw. 60 bar) bei der Wellenbildung beobachtet werden.

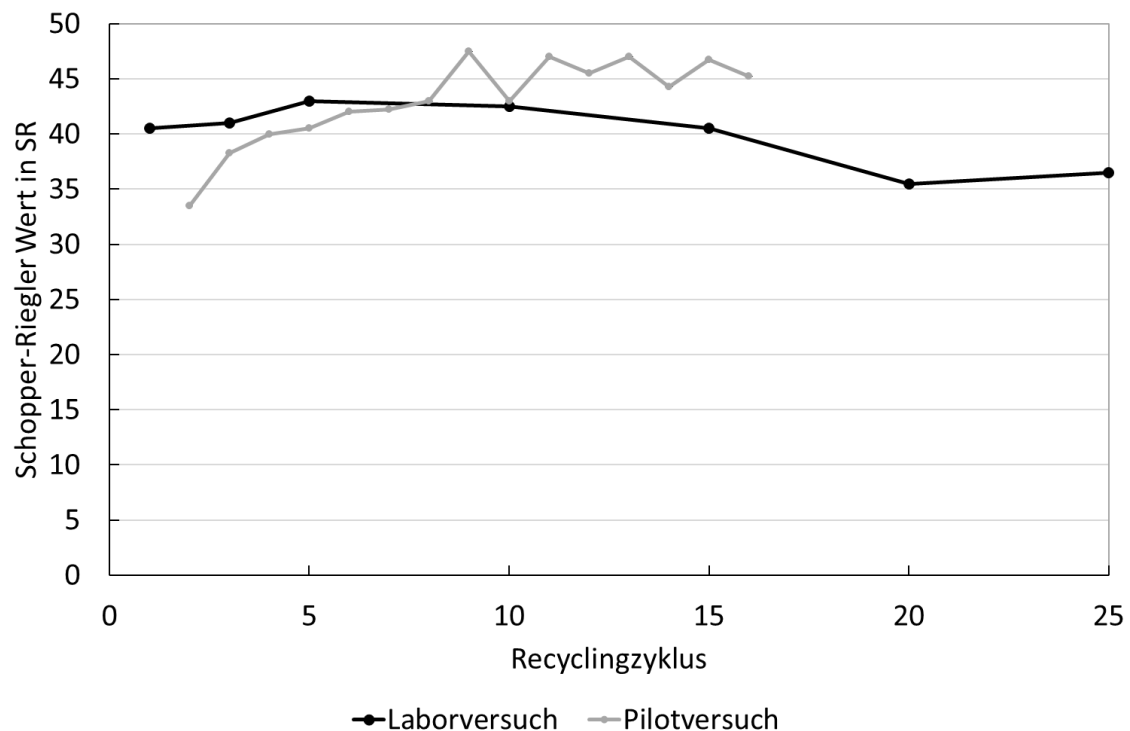


Abbildung 5-49: SR-Werte für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab

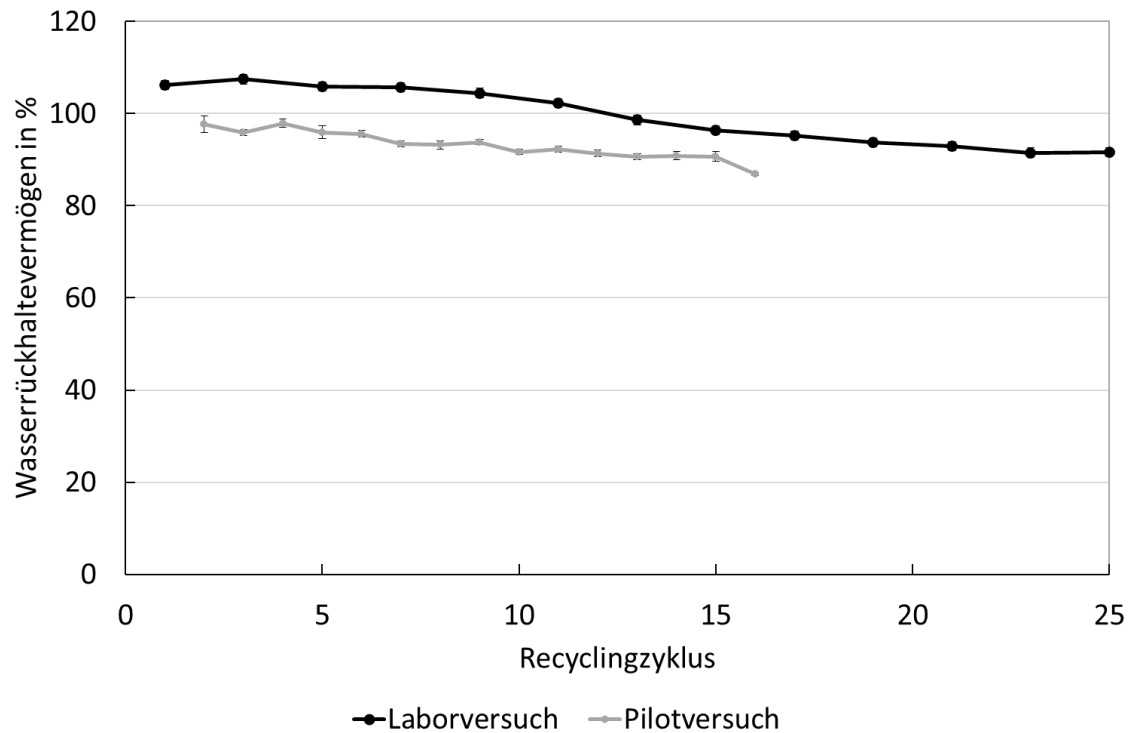


Abbildung 5-50: WRV-Werte für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab

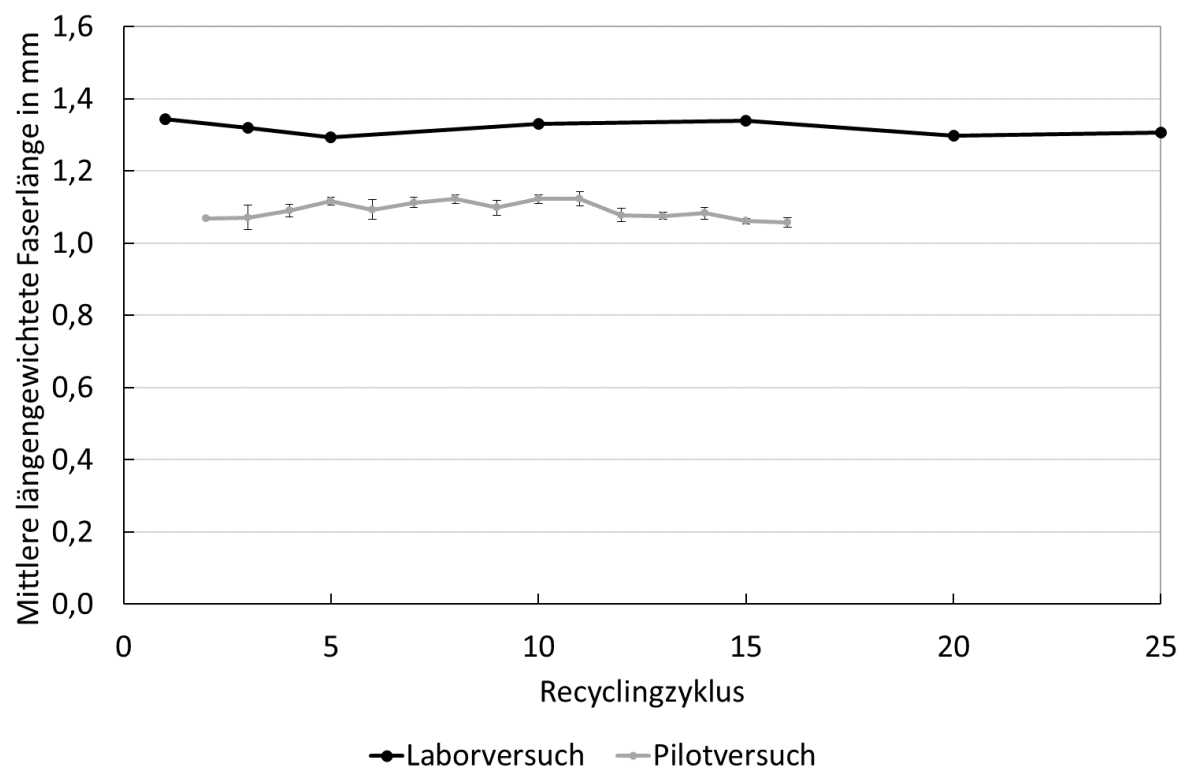


Abbildung 5-51: Mittlere längengewichtete Faserlänge für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab

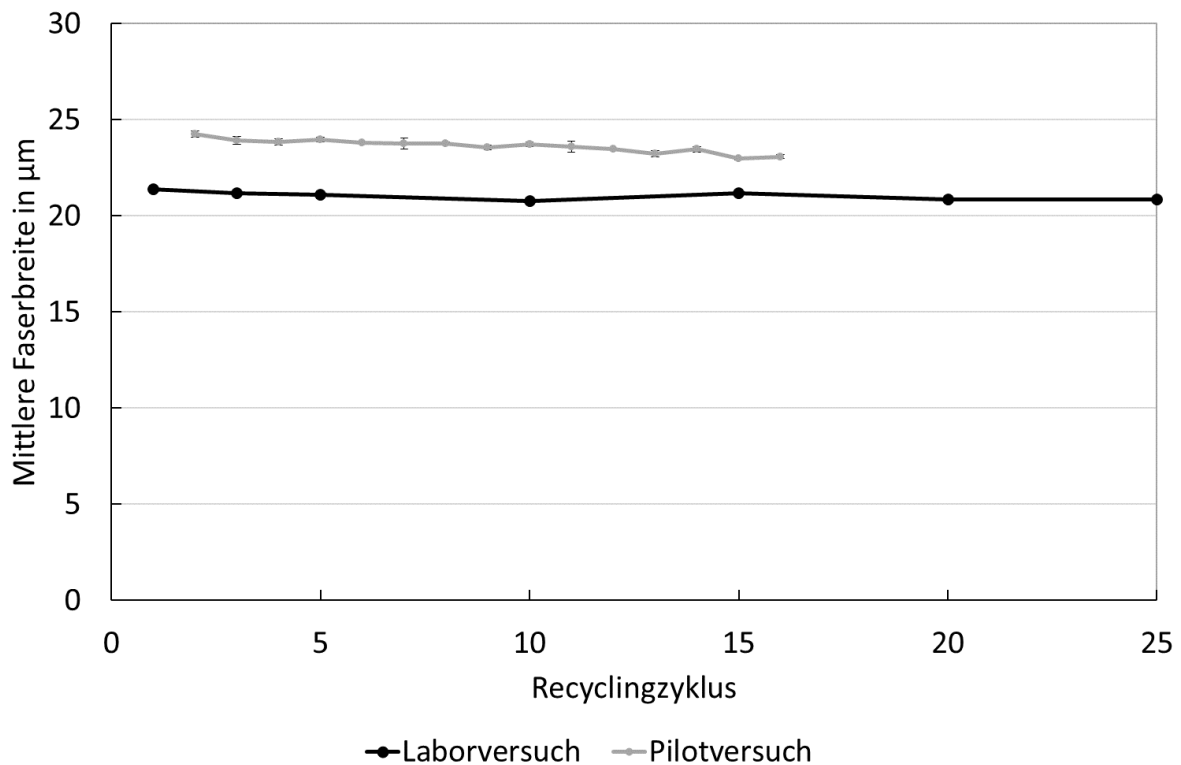


Abbildung 5-52: Mittlere Faserbreite für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab

### Laborblattprüfung

Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung der Laborblätter sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Für faserorientierungsabhängige Messwerte wie bspw. die Reißlänge wird erwartet, dass die Messwerte der Laboruntersuchungen zwischen den Ergebnissen der Pilotversuche für MD und CD lokalisiert sind.

Die Ergebnisse der Messung der Reißlänge sind in Abbildung 5-53 dargestellt. Während die Reißlänge in CD nahezu konstant bleibt, ist für die Werte in MD ein deutlicher Einfluss des Füllstoffgehaltes zu identifizieren. Bis Zyklus 15 steigen die Werte der Reißlänge in dem Maße an, in dem Füllstoffe verloren gehen. Nach der Zugabe von Calciumcarbonat sinkt der Wert der Reißlänge in Zyklus 16 wieder deutlich auf das Niveau von Zyklus 1 ab. Auch in CD ist ein leichter Effekt der  $\text{CaCO}_3$ -Zugabe zu sehen.

Die Werte der CMT-Prüfung (Abbildung 5-54) sind im Pilotversuch stärker abnehmend als im Laborversuch. Die Zugabe von  $\text{CaCO}_3$  nach Zyklus 15 hat jedoch keine Auswirkung auf den CMT-Wert.

Die RCT- (Abbildung 5-55), SCT- (Abbildung 5-56) und S-Test-Werte (Abbildung 5-57) bleiben bis Zyklus 15 des Mehrfachrecyclings konstant. Die  $\text{CaCO}_3$ -Zugabe bewirkt in Zyklus 16 jedoch einen deutlichen Abfall von ca. 10 N (RCT in MD) bzw. 0,4 N (SCT in MD) bzw. 0,2 kN/m (S-Test in MD) unter das Niveau von Zyklus 1.

Der Berstdruck (Abbildung 5-58) weist für die Pilotversuche bis Zyklus 15 einen leichten Anstieg von 20 kPa gegenüber Zyklus 1 auf. Die Zugabe von  $\text{CaCO}_3$  bewirkt jedoch einen deutlichen Abfall von knapp 60 kPa.

Die Nullreißlänge (Abbildung 5-59) lässt eine Aussage über die Entwicklung der Faserfestigkeit im Verlauf des Mehrfachrecyclings zu. Die Nullreißlänge nimmt bis Zyklus 11 leicht zu (+2 MPa gegenüber Zyklus 1 in MD) und fällt bis Zyklus 15 um 3 MPa (MD) unter den Wert von Zyklus 1. Die Zugabe von  $\text{CaCO}_3$  bewirkt einen Abfall der Nullreißlänge in Zyklus 16 um 2 MPa.

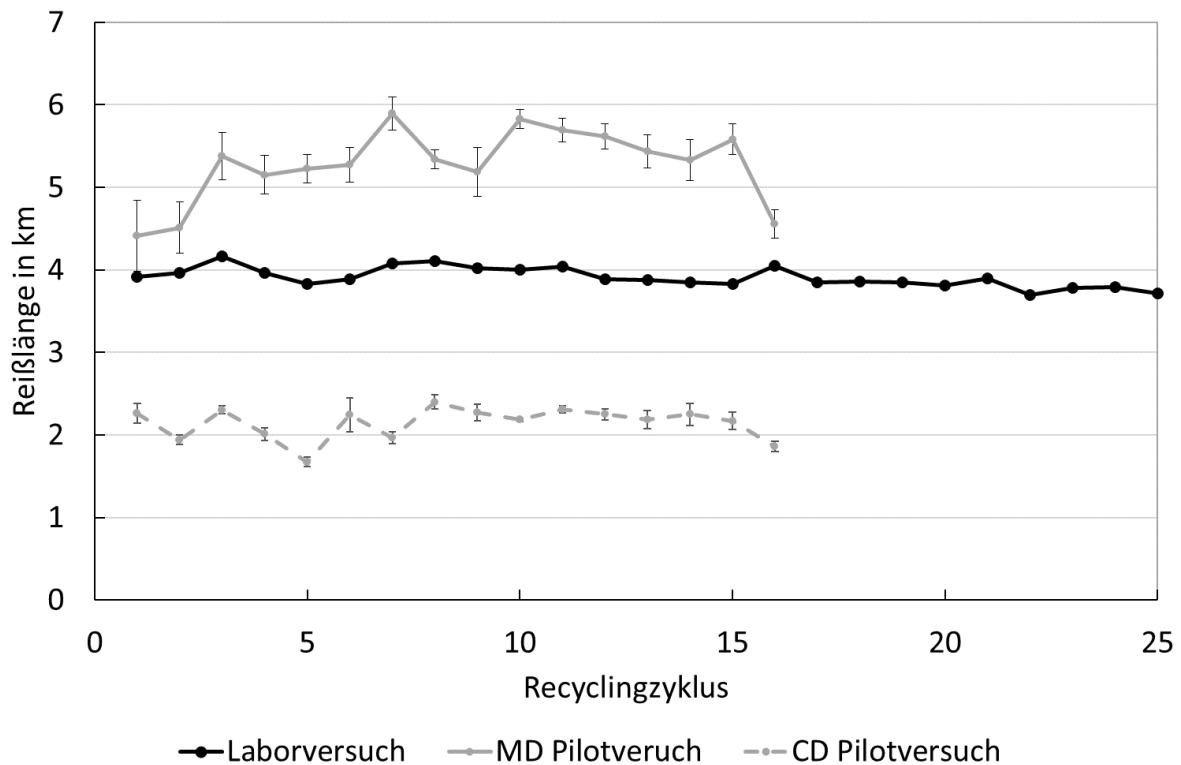


Abbildung 5-53: Reißlänge für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab

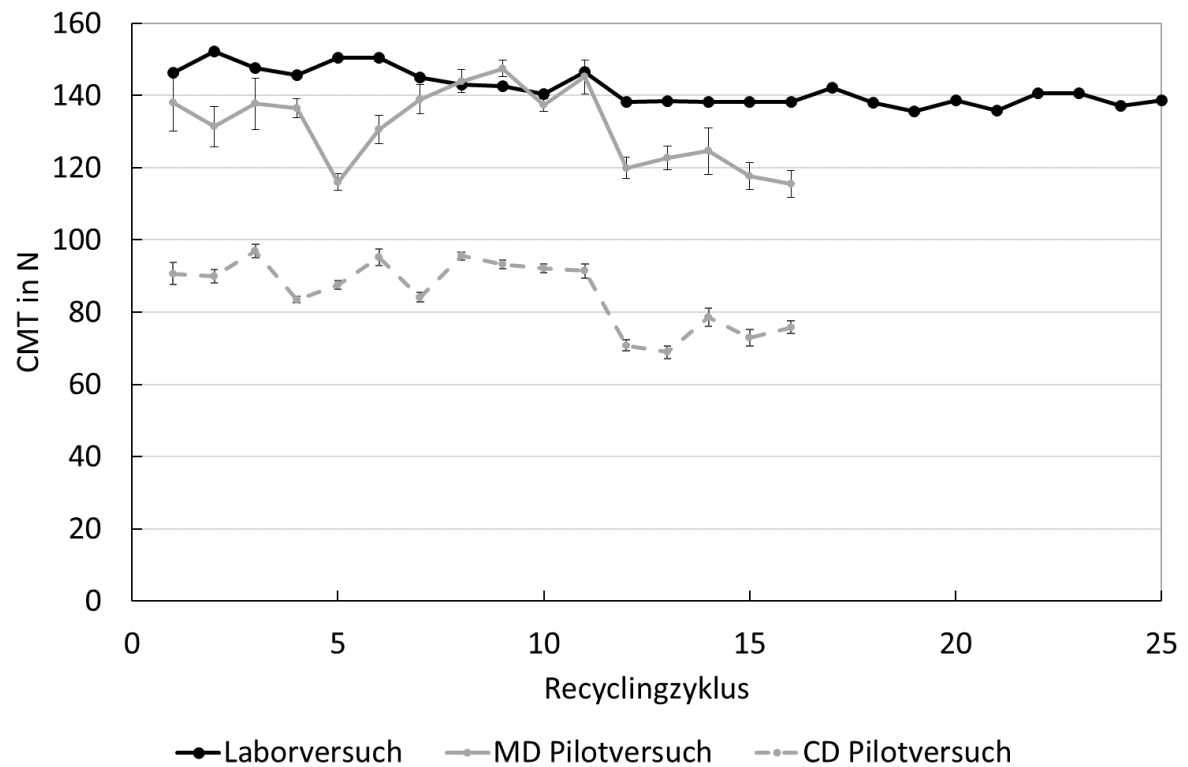


Abbildung 5-54: CMT-Wert für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab

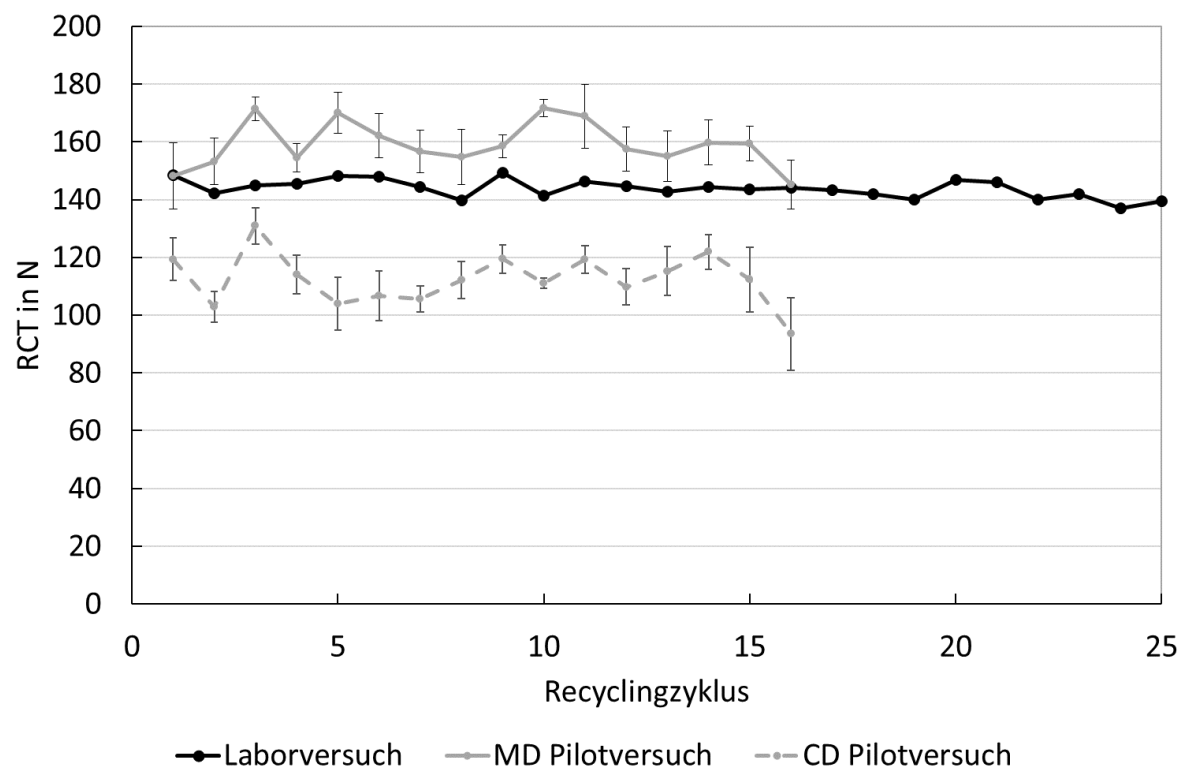


Abbildung 5-55: RCT-Wert für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab

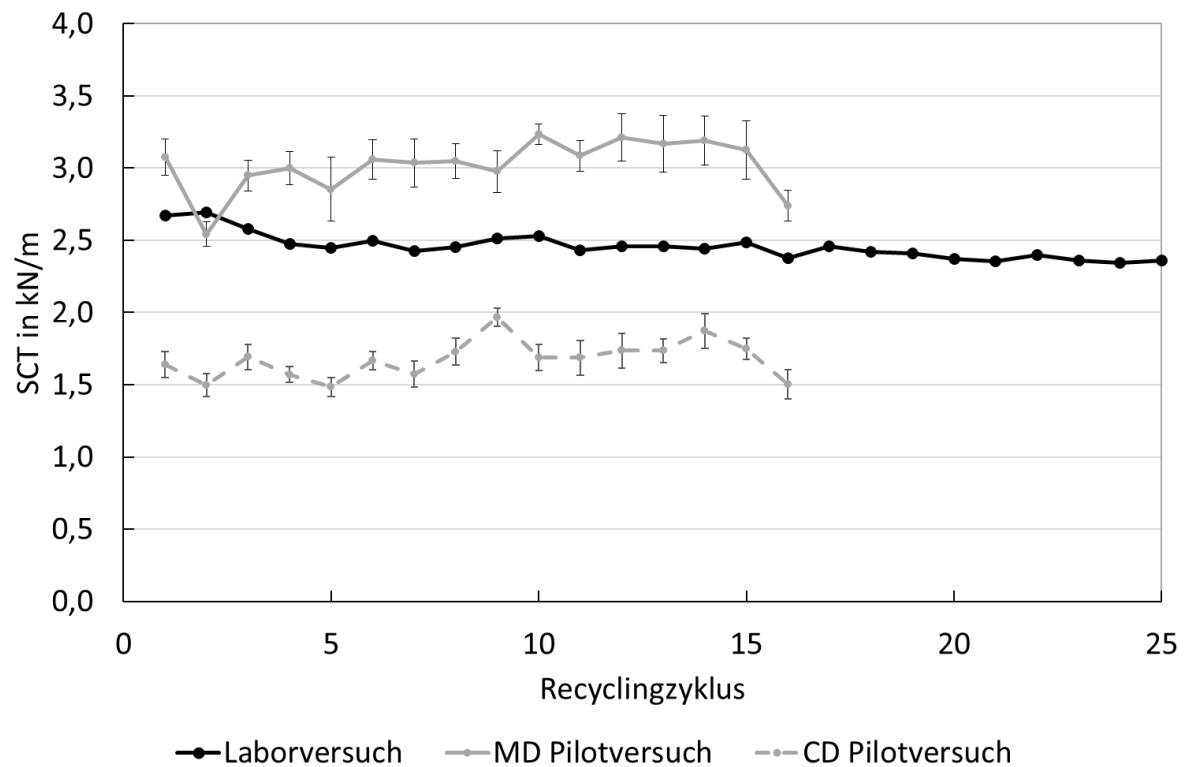


Abbildung 5-56: SCT-Wert für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab

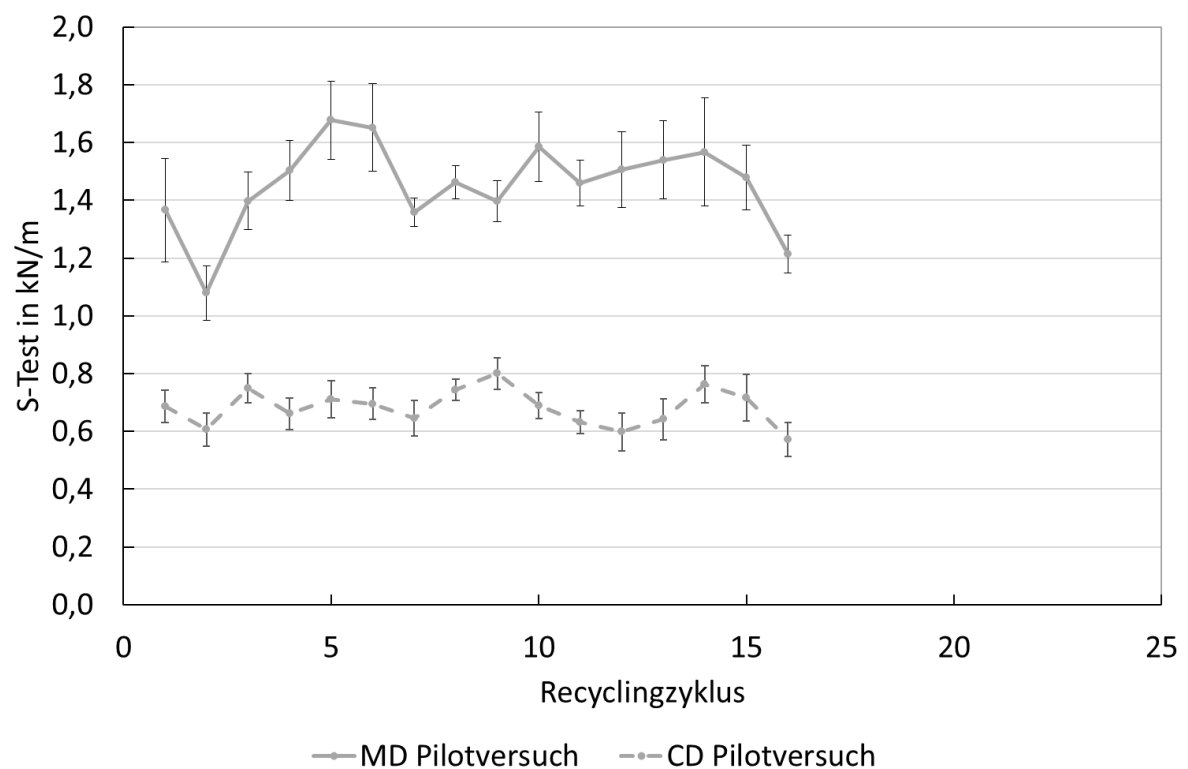


Abbildung 5-57: S-Test-Wert für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab

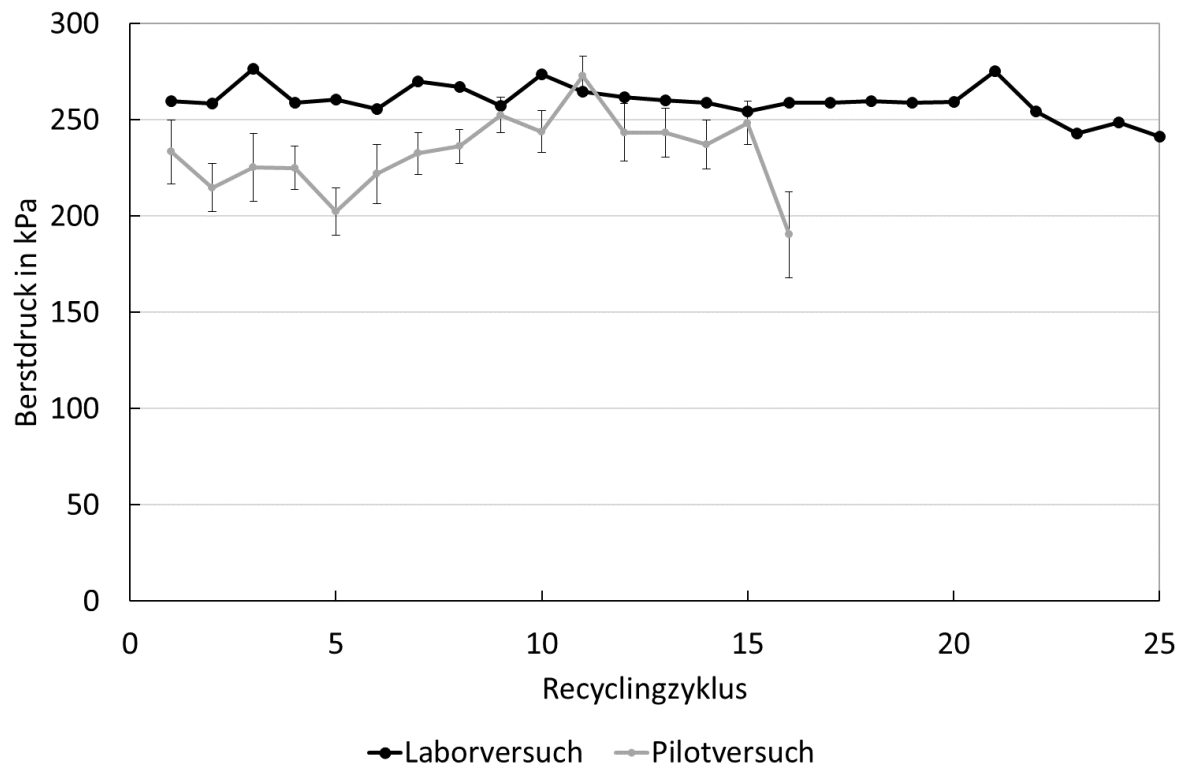


Abbildung 5-58: Berstdruck für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab

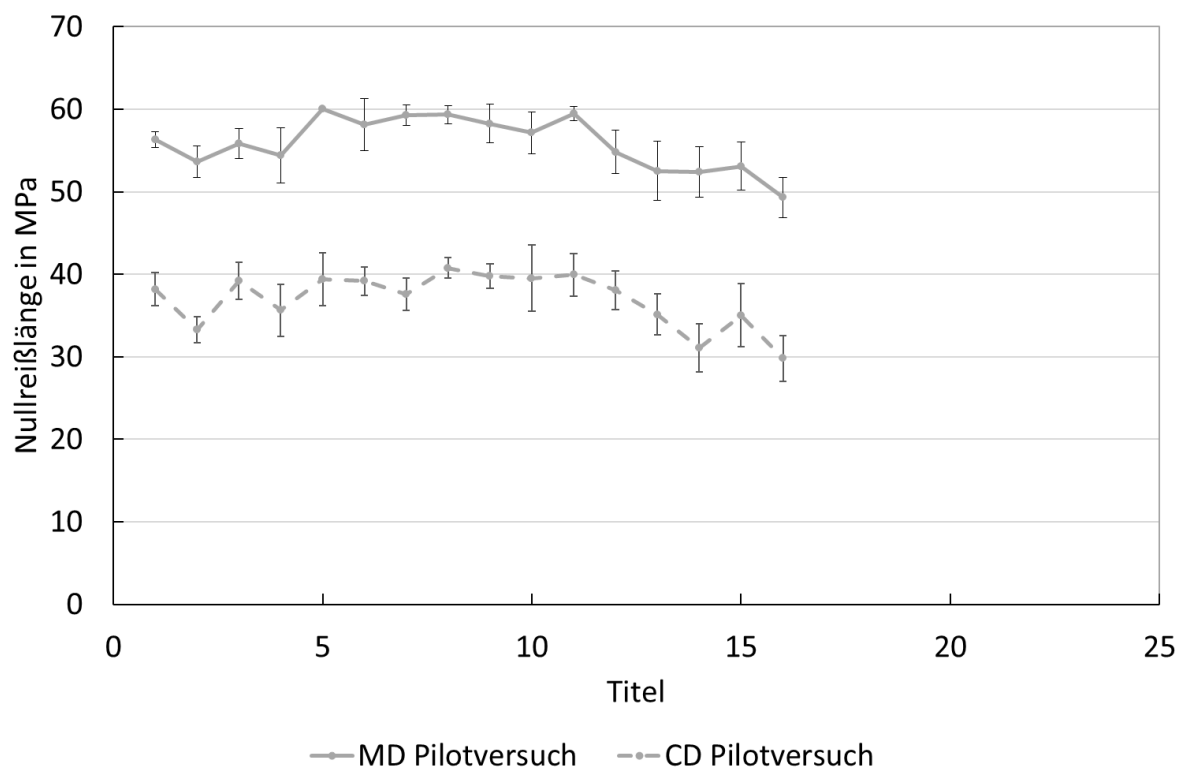


Abbildung 5-59: Nullreißlänge für Mehrfachrecyclingversuche im Labor- und Pilotmaßstab



Die mechanischen Kennwerte nehmen in den Pilotversuchen häufig geringfügig zu, während die gleichen Kennwerte im Laborversuch konstant bleiben. Dies kann vorrangig auf den schnelleren Verlust von Füllstoffen und den stärkeren Anstieg der SR-Werte im Pilotversuch zurückgeführt werden. Die Ergebnisse nach der  $\text{CaCO}_3$ -Zugabe im 16. Recyclingzyklus können aufgrund des höheren Füllstoffgehaltes nicht direkt mit Zyklus 1 verglichen werden, lassen aber dennoch die Aussage zu, dass die Papiereigenschaften durch das 16-fache Recycling nicht oder nur unbedeutend verändert werden und es keinerlei Hinweis darauf gibt, dass aus dem Fasermaterial kein Papier mehr hergestellt werden könnte. Die Ergebnisse des Laborversuchs werden somit bestätigt und es ist davon auszugehen, dass das Fasermaterial noch deutlich häufiger als 16 (Pilotversuch) bzw. 25 (Laborversuch) Mal rezykliert werden kann. Im Hinblick auf Festigkeitskennwerte kann ebenso die Aussage getroffen werden, dass die Papierfestigkeit durch einen verminderten Füllstoffgehalt gesteigert wird. Durch das Entfernen von Mineralien aus dem Altpapier könnte somit das Faser- und Papierfestigkeitspotential besser genutzt werden. Dies ist jedoch gegenüber anderen Papiereigenschaften, die von Füllstoffen beeinflusst werden, wie z. B. der Bedruckbarkeit, abzuwiegen.

In den Pilotversuchen wurde auf den Einsatz von Hilfsmitteln wie bspw. Retentions- und Formationsmitteln verzichtet. Inwiefern diese Hilfsmittel das Mehrfachrecycling beeinflussen, kann somit nicht beurteilt werden. Die Pilotversuche können industrielle Bedingungen besser simulieren, als die Laboruntersuchungen. So wird die Suspension z. B. im Pilotversuch gepumpt, was in den Laboruntersuchungen nicht der Fall war. Dennoch mussten auch bei den Pilotversuchen Prozessschritte der Altpapieraufbereitung wie die Drucksortierung und die Cleanerreinigung ausgelassen werden, um Faserverluste zu minimieren.

## 5.5 Arbeitspaket 5: Modellierung

Die am PMV vorhandene Modellierungssoftware für grafische Papiere setzt die Kenntnis der Mutterkurven in Form einer mathematischen Funktion des eingesetzten Rohstoffes voraus. Die Mutterkurve kann dabei linear oder logarithmisch zu- oder abnehmen und stellt die Veränderung der Eigenschaft  $E_{n,i}$  über die Faser-generationen  $n$  im Mehrfachrecycling dar. Für grafische Papiere konnte gezeigt werden, dass sich die Eigenschaften  $E_{M,i}$  einer Papiersorte  $i$  als Generationen-Mischung aus der Mutterkurve der betreffenden Eigenschaft  $E_{n,i}$  und den Masseanteilen  $g_{n,i}$  der Generationen  $n$  nach folgendem Ansatz linear massengewichtet berechnen lassen:

$$E_{M,i} = \sum_{n=0}^{\infty} g_{n,i} \cdot E_{n,i}$$

Bei der Ermittlung der Mutterkurven wurden in Laborversuchen Rohstoffe ohne Füllstoff und eine Mischung dieser Rohstoffe im Mehrfachrecycling untersucht und die Gültigkeit der Mischungsregel verifiziert.

Die Erkenntnisse der Laborversuche wurden durch Pilotversuche überprüft. Dabei wurde eine Mischung der bekannten Komponenten mit einem Füllstoffgehalt von anfangs 12 % mehrfach rezykliert. Der Füllstoffgehalt wurde während der Versuche im Bereich zwischen 10 und 12 % gehalten. Die Tendenzen der Laborversuche konnten in Pilotversuchen bestätigt werden. Jedoch ist ein deutlicher Unterschied im Niveau der Messdaten einerseits durch die Füllstoffzugabe, andererseits durch die Vorzugsrichtung der Fasern bei der Papierproduktion im Pilotmaßstab zu erkennen [8].

Für die Berechnung von physikalischen Eigenschaften eines Altpapierstoffs werden daher folgende Informationen benötigt:

- Altersstruktur des Altpapierstoffs
- Faserstoffzusammensetzung und Füllstoffgehalt des Altpapierstoffs
- Eigenschaftsentwicklung über Recyclingzyklen getrennt nach Faserstoffen (Mutterkurven)
- Mischungsregeln sowohl für Faserstoff- als auch für Generationen-Mischungen

Mit Hilfe dieser Informationen können Szenarien für zukünftige Altpapierzusammensetzungen und deren Eigenschaften berechnet werden.

In diesem Projekt sind die Randbedingungen jedoch andere. In den Laboruntersuchungen wurden Primärfaserpapiere und Recyclingpapier untersucht. Für die beiden Primärfaserpapiere ist die Altersstruktur bekannt, die genaue Zusammensetzung des Faserstoffs jedoch nicht. Somit kann keine Mutterkurve der einzelnen Faserstoffe angegeben werden. Unter der Annahme, dass die Mischungsregel anwendbar ist, könnte jeweils eine Mutterkurve für die Mischung der Faserstoffe der beiden Primärfaserpapiere angegeben werden.

Die benötigten Informationen der drei Recyclingpapiere können jedoch nicht ermittelt werden. Es ist weder die initiale Altersstruktur noch die genaue Faserstoffzusammensetzung der Papiere bekannt. Zudem wurde der Füllstoffgehalt der Proben im Mehrfachrecycling nicht konstant gehalten, sodass sich neben der Entwicklung der Fasereigenschaften über die Recyclingzyklen auch der überlagernde Einfluss des veränderten Füllstoffgehaltes auswirkt. Da der Füllstoffgehalt in den Laborversuchen aus AP1, um Faserverluste zu minimieren, nur im ersten und letzten Zyklus gemessen wurde, kann keine aussagekräftige Mutterkurve für die Faser- und Generationenmischung der Recyclingpapiere ermittelt werden.

Für die initiale Altersstruktur der Recyclingpapiere in diesem Projekt können Annahmen getroffen werden, die aus Faseraltersberechnungen durch Massenstrombilanzen beispielsweise von Meinl [42] stammen. Diese berechnete Faseraltersverteilung könnte als Annahme für die Gewichtungsfaktoren  $g_{n,i}$  der Fasergenerationenverteilung der Recyclingpapiere angesetzt werden, wobei  $n$  die Generation darstellt. Im Fall des Recyclingpapiers fehlt entsprechend die Generation 0 der Primärfasern. So ergibt sich für den untersuchten TL 3, analog für WS und TL 2, für die Eigenschaften der Generationenmischung  $E_{M,TL3}$  in jedem Mehrfachrecycling-Zyklus folgende Eigenschaftsgleichung:

$$E_{M,TL3,R} = \sum_{n=1}^k g_{n,TL3,R} \cdot E_{n,TL3,R}$$

Es ergibt sich somit für die Mehrfachrecycling-Untersuchungen ein Gleichungssystem mit  $m$  Gleichungen, wobei  $m$  die Anzahl der durchgeführten Zyklen ist und  $k$  die Anzahl der betrachteten Fasergenerationen in der Mischung.

$$\begin{bmatrix} E_{M,TL3,1} \\ \vdots \\ E_{M,TL3,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{1,TL3,1} & \cdots & g_{k,TL3,1} & 0 & \cdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \cdots & g_{m,TL3,m} & \cdots & g_{m+k,TL3,m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{G,1} \\ \vdots \\ E_{G,m+k} \end{bmatrix}$$

Da dem Papier im Mehrfachrecycling keine weiteren Fasern hinzugefügt werden, wandern die  $k$  Gewichtungsfaktoren der Massenverteilung in jedem Zyklus um eine Stelle in der Matrix weiter nach rechts. Es gilt somit:

$$g_{k,TL3,m} = g_{k+1,TL3,m+1}$$

Für die Gewichtungsfaktoren ergibt sich somit eine Matrix mit  $m + k \times m$  Einträgen, wobei die Einträge unterhalb und oberhalb der  $k$  ausgefüllten Diagonalen Null sind.

Die Einträge des Vektors für die Mischungseigenschaften sind bekannt, da es sich um die Messwerte der Versuche handelt. Die Einträge der Gewichtungsfaktoren können aus rechnerisch ermittelten Faseraltersverteilungen angenommen werden. Die Eigenschaften der einzelnen Fasergenerationen müssten jedoch rekursiv berechnet werden. Da es  $m$  Gleichungen gibt, aber  $m+k$  Variablen ist das Gleichungssystem analytisch nicht lösbar. Dieser Ansatz kann aufgrund der Datenlage nicht sinnvoll weiterverfolgt werden. Da bereits die Altersstruktur angenommen werden müsste, wäre zudem die Aussagekraft fragwürdig.

Auch das Überprüfen der Mischungsregel anhand der Laboruntersuchungen ist nicht möglich. Es könnten anhand der Einzelpapiere Eigenschaften der Mischungen einer Altersgeneration berechnet und mit den Eigenschaften der untersuchten WPRP-Mischung verglichen werden. Aufgrund des unbekannten Glührückstandes der einzelnen Zyklen sind jedoch deutliche Abweichungen zu erwarten, die nicht in der Berechnung berücksichtigt werden können.

Die Modellierung des Mehrfachrecyclings von Wellpappenrohpapieren und Wellpappe stellt somit eine besondere Herausforderung dar. Um die Eigenschaften eines Wellpappenrohpapieres sinnvoll modellieren zu können, müssten die eingesetzten Faserrohstoffe einzeln in verschiedenen Recyclingzyklen vorliegen. Des Weiteren müsste die Faserzusammensetzung und Altersstruktur des Papiers bekannt sein. Erschwerend kommt hinzu, dass ein nicht zu erfassender Altpapierimport durch Verpackungen vorhanden ist. Dieses importierte Altpapier weist wiederum eine eigene Faserzusammensetzung und Altersstruktur auf.

## **6 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)**

### **6.1 Voraussichtlicher Nutzen der Forschungsergebnisse**

Die erzielten Forschungsergebnisse leisten einen Beitrag bei der Ökobilanzierung und Lebenszyklusbetrachtung von Wellpappenrohpaperen, Wellpappe und den daraus erzeugten Produkten für Verpackungszwecke. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse des Mehrfachrecyclings unter Laborbedingungen, dass ein Kollaps des Recyclingsystems durch die häufigere Nutzung der Fasern nicht zu erwarten ist. Dennoch müssen grundsätzlich weiterhin Frischfasern im Gesamtsystem zugeführt werden, um die Faserverluste bei der Altpapieraufbereitung auszugleichen. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Reduktion des Mineraliengehaltes im Altpapier eine Möglichkeit darstellt das Festigkeitspotential der Fasern besser auszunutzen. Somit kann auch mit häufig rezyklierten Fasern qualitativ hochwertiges Papier bzw. Papier gleicher Qualität bei geringerer flächenbezogener Masse hergestellt werden.

### **6.2 Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit**

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ermöglichen eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der papierherstellenden und der gesamten papierverarbeitenden Industrie. Es konnte in den Untersuchungen gezeigt werden, dass Papier unter Laborbedingungen mindestens 25 Mal und in den Pilotversuchen mindestens 16 Mal rezykliert werden kann. Danach musste der Versuch beendet werden, da nicht mehr ausreichend Material für weitere Zyklen zur Verfügung stand. Dies bietet die Perspektiven, auch einen geschlosseneren Altpapierkreislauf mit qualitativ hochwertigen Papieren aufrecht erhalten zu können, sofern weniger Fasern wegen Verunreinigungen und Störstoffen bei der Altpapieraufbereitung ausgeschleust werden müssen. Das Recycling von Altpapier ist im Vergleich zu Frischfasermaterial umweltfreundlicher und entspricht den Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Bei der Herstellung realer Papierprodukte können andere Hilfsstoffe zum Einsatz kommen, die das Recycling nachhaltig beeinträchtigen können und in diesem Projekt nicht simuliert wurden. Durch verbesserte Prozesse der Altpapieraufbereitung und bessere Abstimmung der eingesetzten Materialien der gesamten papiererzeugenden und -verarbeitenden Industrie inklusive der Hersteller von Klebstoffen, Farben und anderer eingesetzter Hilfsstoffe ist eine höhere Ausbeute des Fasermaterials möglich. Durch eine ganzheitliche Herangehensweise könnte es gelingen den

Altpapierkreislauf ohne größere Einbuße bei der Papierqualität weiter zu schließen. Das vollständige Schließen des Altpapierkreislaufs wird ist aufgrund der stets vorhandenen Materialverluste jedoch unmöglich. Dem Rückgang der Produktion von grafischen Papieren und somit dem fehlenden Eintrag von Frischfasern kann dennoch etwas gelassener entgegengeblickt werden.

### **6.3 Aussagen zur voraussichtlichen Umsetzung der FuE-Ergebnisse**

Einige der im Rahmen des Projektes erlangten Erkenntnisse zum Mehrfachrecycling von Wellpappenrohpapieren können direkt von den KMU der Wellpappen- und Wellpappenrohpapiererzeuger umgesetzt werden. Mit den erreichten Forschungsergebnissen können Ökobilanzen und Lebenszyklusbetrachtungen von papierbasierten Einwegverpackungen aus Wellpappe oder Karton neu betrachtet werden. Zudem tragen die Ergebnisse dazu bei, mit dem Mythos, dass eine Faser nur 5 bis 7 Mal recykliert werden könne, aufzuräumen. Dies bietet neue Argumente gegenüber anderen Verpackungsmaterialien, stellt die Papierindustrie gleichzeitig aber auch vor die Herausforderung Papier möglichst häufig im Recyclingsystem als Rohstoff zu nutzen, sodass das Fasermaterial so häufig genutzt wird, wie es genutzt werden kann.

## 7 Ergebnistransfer

Die im Projektantrag dargestellten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurden planmäßig durchgeführt. Bereits während der Projektlaufzeit wurde das Thema bei verschiedenen Fachveranstaltungen und in diversen Vorträgen vorgestellt. Eine Auflistung der während der Projektlaufzeit durchgeführten Transfermaßnahmen ist in Tabelle 7-1 dargestellt.

Tabelle 7-1: Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel/Bemerkung	Zeitraum
Veröffentlichung auf der Internetseite des PMV	Vorstellung des Forschungsvorhabens www.pmv.tu-darmstadt.de	Q I/2018
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	1. Vorstellung des Forschungsvorhabens, Diskussion und Festlegung der Vorgehensweise	05.12.2017
	2. PA-Sitzung im Rahmen des AiF-Tages	08.03.2018
	3. PA-Sitzung im Rahmen des AiF-Tages	21.03.2019
	4. Fortschrittsbericht, Diskussion der bisherigen Ergebnisse, Abstimmung der weiteren Vorgehensweise	14.11.2019
	5. Abschlusspräsentation, Diskussion der Ergebnisse	02.06.2020
Erstellen von Berichten	1. Fortschrittsbericht für die IGF	Q I/2018
	Bericht für den Verband Deutscher Papierfabriken (VDP) an europäische Papierfabriken, Zulieferer und Institute (INFOR-Forschungsreport)	Q IV/2018
	2. Fortschrittsbericht für die IGF	Q I/2019
	Bericht für den Verband Deutscher Papierfabriken (VDP) an europäische Papierfabriken, Zulieferer und Institute (INFOR-Forschungsreport)	Q IV/2019
Gremienarbeit	ZELLCHEMING Fachausschuss für Altpapierverwertung RECO	Laufend
	ZELLCHEMING Fachunterausschuss TECH (Altpapiertechnologie)	Laufend
	Technischer Ausschuss Vereinigung Pack- und Wellpappenpapiere (VPWP)	21.11.2019
	ZELLCHEMING/ VPM Tagung der Bezirksgruppe Nord	08.11.2019
Akademische Lehre, Bachelor- und Masterarbeit zur Thematik des Forschungsprojekts	Bachelorarbeit: „Untersuchung des Einflusses der Stärkeapplikation auf das Mehrfachrecycling von Wellpappenrohpaper“	Q I/2019
	Masterarbeit: „Untersuchung des Mehrfachrecyclingverhaltens von Wellpappenrohpaper im Pilotmaßstab“	Q IV/2019
	Akademische Ausbildung, Vermitteln wissenschaftlicher Methoden, Selbstständiges wissenschaftliches Arbeiten	
Beratung kleiner und mittlere Unternehmen	Technologietransfer in interessierte Unternehmen	Kontinuierlich

Veröffentlichungen und Präsentationen von signifikanten Ergebnissen in Fachzeitschriften und bei Fachtagungen	<u>Wochenblatt für Papierfabrikation 6/2018</u> „Der Mythos begrenzter Faserlebenszyklen – Über die Leistungsfähigkeit einer Papierfaser“	Juni 2018
	<u>Papier und Umwelt Tagung 2019, Darmstadt</u> „Mehrfachrecycling von Papierfasern – Ein Zyklus ohne Ende?“	10.04.2019
	<u>TAPPI Papercon 2019, Indianapolis</u> „Multiple Recycling of Paper Board: Determination of Changes in Characteristics of Paper Board and Assessment of the Maximum Number of Recycling Cycles– Part I: Multiple recycling of corrugated base paper“	07.05.2019
	<u>Symposium der Papieringenieure 2019, Salzburg</u> Berichte zum Studium, Prof. Dr.-Ing. S. Schabel	26.10.2019
	<u>TAPPI Journal</u> „Multiple recycling of paperboard: Paperboard characteristics and maximum number of recycling cycles – Part I: Multiple recycling of corrugated base paper“	November 2019
	<u>PTS Forschungsforum, Heidenau</u> „Mehrfachrecycling von Wellpappe“	03.12.2019
	<u>Papier + Technik</u> „Papierfasern können häufiger rezykliert werden als gedacht“	06.02.2020

Durch die zahlreichen Veröffentlichungen, Vorträge und Treffen des projektbegleitenden Ausschusses war ein Ergebnistransfer zu KMU bereits während der Projektlaufzeit gewährleistet. Ziel der Projekttreffen war die kontinuierliche Information der beteiligten Unternehmen sowie die Diskussion der Vorgehensweise und erzielten Ergebnisse. Dies diente einerseits zur Absicherung der Praxisrelevanz der durchgeführten Arbeiten und ermöglichte den Unternehmen andererseits die direkte und zeitnahe Nutzung der Forschungsergebnisse. Durch die Vorstellung des Projektes auf der Internetseite der Forschungsstelle und zahlreiche Pressemitteilungen in unterschiedlichen Zeitschriften wurde die Öffentlichkeit über die Forschungstätigkeit informiert. Die Vorstellung der Forschungsarbeiten sowie detaillierter Forschungsergebnisse auf Fachtagungen und Gremien stellte die Bekanntmachung des Forschungsvorhabens und den Wissenstransfer gegenüber dem Fachpublikum aus der papierverarbeitenden Branche sicher. Außerdem wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens je eine Bachelor- und Masterarbeit angefertigt. Durch die Vermittlung wissenschaftlicher Methoden und einer selbstständigen wissenschaftlichen Arbeitsweise wurde somit ein Beitrag zur akademischen Ausbildung geleistet. Darüber hinaus wurde das Forschungsvorhaben Interessenten aus Industrie und Forschung auch außerhalb des projektbegleitenden Ausschusses in persönlichen Gesprächen vorgestellt und dessen Inhalte diskutiert.



Weiterhin sind die in Tabelle 7-2 aufgeführten Transfermaßnahmen nach Ende der Projektlaufzeit geplant.

Tabelle 7-2: Geplante Maßnahmen nach Ende der Projektlaufzeit

<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel/Bemerkung</b>	<b>Zeitraum</b>
Gremienarbeit	Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Präsentation aller relevanten Ergebnisse z. B. ZELLCHEMING-Fachausschüsse „RECO“, „TECH“, Vereinigung Pack-Und Wellpappenpapiere	ab Sommer 2020
Fachtagungen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Präsentation der relevanten Ergebnisse z. B. TAPPI Research Forum, Zellcheming-Messe	ab Sommer 2020
Veröffentlichungen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Präsentation der relevanten Ergebnisse (z. B. TAPPI Journal, Wochenblatt für Papierfabrikation)	ab Sommer 2020
Ergebnisweitergabe an interessierte Fachverbände	Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Präsentation der relevanten Ergebnisse (z. B. VDP, VPWP, VDW)	ab Sommer 2020
Veröffentlichung im Internet	Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Präsentation der Ergebnisse (Internetseiten PMV, Forschungsvereinigung Zellstoff- und Papierindustrie VDP)	Q IV/2020
Vorlesung an der Technische Universität Darmstadt, DHBW Karlsruhe, HS München	Übernahme der Ergebnisse in die akademische Aus- und Weiterbildung	ab Sommer 2020
Beratung kleiner und mittelständischer Unternehmen	Technologietransfer in interessierte Unternehmen	ab Sommer 2020
Veröffentlichung des ausführlichen Forschungsberichtes als PDF	Information interessierter Unternehmen über die Forschungsergebnisse	ab Sommer 2020

Die im Forschungsbericht dargestellten Ergebnisse bieten für interessierte Unternehmen einen umfassenden Einblick in die Forschungsarbeiten. Eine entsprechende Kurzzusammenfassung der Forschungsergebnisse ist auf der Homepage des PMV zu finden. Darüber hinaus wird der ausführliche Schlussbericht nach Akzeptanz durch den Fördermittelgeber publiziert und ist somit für alle Interessierten zugänglich. Weiterhin werden die Forschungsergebnisse durch Veröffentlichungen in Fachzeitschriften verbreitet und insbesondere an das Fachpublikum der oben genannten Tagungen und Gremien herangetragen. Insgesamt sind somit zahlreiche Möglichkeiten gegeben, um die Ergebnisse des Forschungsvorhabens KMUs erfolgreich verfügbar zu machen sowie den Ergebnistransfer in die Wirtschaft sicherzustellen.

## 8 Danksagung

Das IGF-Vorhaben 19685 N der Forschungsvereinigung „Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V.“ wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Unser Dank gilt weiterhin den Projektbegleitern aus der Industrie für deren Unterstützung.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Literaturverzeichnis

1. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), *Papier Kompass 2019*. 2019: Bonn.
2. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), *Papier 2020 - Ein Leistungsbericht*. 2019: Bonn.
3. N.N.; FEFCO. *Annual Statistics 2005*. 20.04.2020 [cited 2019 Jan 17]; Available from: [http://www.fefco.org/sites/default/files/documents/Annual%20Statistics%20Y%202005%202nd%20Release\\_Non\\_members.pdf](http://www.fefco.org/sites/default/files/documents/Annual%20Statistics%20Y%202005%202nd%20Release_Non_members.pdf).
4. N.N.; FEFCO. *Annual Statistics 2018*. 20.04.2020 [cited 2019 Jan 17]; Available from: [https://www.fefco.org/sites/default/files/documents/Fefco\\_AnnualEvaluation\\_2018.pdf](https://www.fefco.org/sites/default/files/documents/Fefco_AnnualEvaluation_2018.pdf).
5. N.N.; Verein Recycling Papier + Karton. *FAQ*. [cited 2019 Jan 18]; Available from: <http://www.altpapier.ch/de/faq/wieoft>.
6. Clairborne Ray, C. *Through the Mill*. 2010 20.04.2020 [cited 2019 Jan 18]; Available from: <https://www.nytimes.com/2010/12/21/science/21qna.html>.
7. Stürmer, L., *Über die Eigenschaften von Sekundärfaserstoffen aus Altpapier unter dem Einfluss ihrer Vorgeschichte*. 1980: Darmstadt.
8. Hunold, M., *Experimentelle und theoretische Untersuchungen über quantitative und qualitative Auswirkungen steigender Altpapier-Einsatzquoten auf das Recyclingsystem Papier-Altpapier*. 1997: Darmstadt.
9. Schabel, S. and H.-J. Putz, *Rohstoff Altpapier - ein Ausblick*. Wochenblatt für Papierfabrikation, 2005. **133**(3/4): p. 103-111.
10. Bovin, A., N. Hartler, and A. Teder, *Changes in pulp quality due to repeated papermaking*. Paper Technology and Industry, 1973. **14**(5): p. 261-264.
11. Howarth, P. and C.C. Rogers, *The Effect of Re-use on the Properties of Machine Recycled Paper*, in *1975 International Paper Physics Conference, Ellenville, NY, TAPPI Press Conference Proceedings*. 1975.
12. Cardwell, R.D. and S.D. Alexander, *Effects of recycling on softwood kraft pulp properties*. Appita, 1977. **30**(4): p. 327-333.
13. van Wyk, W. and G. Gerischer, *The influence of recycling on the strength properties of machine made paper*. Paperi ja Puu/Paper and Timber, 1982. **64**(9): p. 526-533.
14. Guest, D. and J. Weston, *Fibre-water interactions: modified by recycling*, in *Tappi Pulping Conference*. 1986: Atlanta. p. 589-595.
15. Chatterjee, A., et al., *Tear and fracture behavior of recycled paper*. Tappi Journal, 1993. **76**(7): p. 109-115.
16. Marton, R., et al., *Recycling and fiber structure*. Progress in Paper Recycling, 1993. **3**(2): p. 58-70.
17. Bouchard, J. and M. Douek, *The effects of recycling on the chemical properties of pulps*. Journal of pulp and paper science, 1994. **20**(5): p. J131.
18. Houen, P.J., T. Helle, and P.O. Johnsen, *Effect of recycling of thermomechanical pulp on some pulp and handsheet properties*, in *18th International Mechanical Pulping Conference 1993*. 1993: Oslo. p. 350-372.
19. Nazhad, M. and L. Paszner, *Temperature effect on paper recycling*. Progress Paper Recycling, 1994. **4**(2): p. 22-28.
20. Sudarsen, N.C. and et al., *Changes in thermomechanical pulp on recycling*. Progress in Paper Recycling, 1995. **4**(2): p. 22-28.
21. Alanko, K., H. Paulapuro, and P. Stenius, *Recyclability of thermomechanical pulp fibres*. Paperi ja Puu/Paper and Timber, 1995. **77**(5): p. 315-328.
22. Reme, P.A. and T. Helle, *The effect of recycling on fibre cross-sectional shape*. COST Action E1 paper recyclability. 1998, Complutense University of Madrid: Madrid.
23. Čabalová, I., F. Kačík, and D. Kačíková, *Recycling of paper—changes of mechanical and optical properties*, in *11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. 2011, Curran Associates Inc.: Albena, Bulgaria. p. 867-874.
24. Höke, U. and S. Schabel, *Recycled Fibre and Deinking*. 2009, Helsinki: Paperi ja Puu Oy. 671.
25. Howard, R.C. and W. Bichard, *The basic effects of recycling on pulp properties*. Journal of Pulp and Paper Science, 1992. **18**(4): p. J151-J159.
26. Horn, R.A., *What are the effects of recycling on fiber and paper properties*. Paper Trade J, 1975. **159**(7/8): p. 78-82.
27. Götsching, L. and L. Stürmer, *Physikalische Eigenschaften von Sekundärfaserstoffen unter dem Einfluss ihrer Vorgeschichte. Teil II. Einfluss des mehrfachen Recyclings*. Wochenblatt für Papierfabrikation, 1978. **106**(23/24): p. 909-918.
28. Nazhad, M., *Recycled fiber quality-A review*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2005. **11**(3): p. 314-329.
29. Jayme, G., *Mikro-Quellungsmessungen an Zellstoff*. Der Papier-Fabrikant - Wochenblatt für Papierfabrikation, 1944(6): p. 187-194S.

30. Law, K.N., J.L. Valade, and J. Quan, *Effects of recycling on papermaking properties of mechanical and high yield pulps. I: Hardwood pulps*. Tappi journal, 1996. **79**(3): p. 167-174.
31. Götttsching, L. and C. Katz, *Papier Lexikon*. 1999. Gernsbach: Dt. Betriebswirte Verlag. 1436.
32. Eriksson, I., et al., *Recycling potential of printed thermomechanical fibers for newsprint*. Tappi journal, 1997. **80**(7): p. 151-157.
33. Hunold, M. and L. Götttsching, *Mehrfach-Recycling im halbtechnischen Maßstab*. Das Papier (Darmstadt), 1996. **50**(10A): p. V82-V90.
34. Engstrand, P., *The Effect of Multiple Recycling on Newsprint Quality - A Large Scale Pilot Study Performed 1992-1996.*, in *PTS-CTP Deinking-Symposium*. 2002: Munich.
35. Koning, J.W. and W.D. Godshall, *Repeated recycling of corrugated containers and its effect on strength properties*. Tappi Journal, 1975. **58**(9): p. 146-150.
36. Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), *Papier 2016*. 2016: Bonn.
37. Cabalova, I., et al., *The effects of paper recycling and its environmental impact*, in *Environmental Management in Practice*. 2011, InTech: Rijeka, Croatia. p. 329-350.
38. Götttsching, L. and L. Stürmer, *Physikalische Eigenschaften von Sekundärfaserstoffen unter dem Einfluss ihrer Vorgeschichte. Teil III. Einflüsse der Papierherstellung (Zustand der Primärfaserstoffe, Hilfsstoffe, Blattbildung, Trocknung)*. Wochenblatt für Papierfabrikation, 1979. **107**(3): p. 69-76.
39. Borchers, B., H. Forkel, and K. Ritter, *Verhalten und Wirkung der Stärke im Neupapier-Altpapier-Kreislauf*. Das Papier (Darmstadt), 1993. **47**(10A): p. V40-V46.
40. Stürmer, L. and L. Götttsching, *Pysikalische Eigenschaften von Sekundärfaserstoffen unter Einfluß ihrer Vorgeschichte. Teil V: Einflüsse der Papierverarbeitung (Wellenbilden)*. Wochenblatt für Papierfabrikation, 1979. **107**(9): p. 309-316.
41. Hunold, M. and L. Götttsching, *Wie "alt" ist Altpapier heute und morgen?* Das Papier, 1993. **47**(10A): p. V172-V185.
42. Meinl, G. and L. Tempel, *Prediction of Paper for Recycling quality on a regional level by using fibre flow models*, in *REFFIBRE Workshop*. 2015: Munich.
43. Board, C.C. CEPI Container Board: *European list of corrugated base papers*. 2016 20.04.2020; Available from: <http://www.cepicontainerboard.org/download.php>.
44. Spielmann, K. and P. Gerards, *Cepi ContainerBoard geht neuen Weg bei der Normierung - Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens für Wellpappenrohapiere*. Wochenblatt für Papierfabrikation, 2017. **145**(1): p. 10-13.
45. Werner, C., *Untersuchung des Einflusses der Stärkeapplikation auf das Mehrfachrecycling von Wellpappenrohapiere*, in *FG Papierfabrikation u. Mech. Verfahrenstechnik*. 2019, Technische Universität: Darmstadt. p. 73.